

(Translation)

Japanese Patent Office
Japanese Patent Laid-Open Publication (A)

Publication No.: 2003-328078

Date of Publication: November 19, 2003

Int. Cl.

C22C 38/00

B25D 17/02

C22C 38/54

C23C 8/22

Request for Examination: Not yet

Number of Claims: 24

(24 pages)

Title: HIGH-HARDNESS, HIGH-TOUGHNESS STEELS AND CRAWLER COMPONENTS, EARTH WEAR RESISTANT COMPONENTS, FASTENING BOLTS, HIGH-TOUGHNESS GEARS, HIGH-TOUGHNESS, HIGH CONTACT PRESSURE RESISTANT GEARS, AND WEAR RESISTANT STEEL PLATES USING THE SAME

Patent Application No.: 2002-135274

Date of Application: May 10, 2002

Inventors : Takemori TAKAYAMA

Applicant: KOMATSU LTD.

Address: 3-6, Akasaka 2-chome, Minato-ku, Tokyo, JAPAN

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-328078

(P2003-328078A)

(43) 公開日 平成15年11月19日 (2003. 11. 19)

(51) Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	キーワード (参考)
C 2 2 C 38/00	3 0 1	C 2 2 C 38/00	3 0 1 Z 2 D 0 5 8
	3 0 2		3 0 2 Z 4 K 0 2 8
B 2 5 D 17/02		B 2 5 D 17/02	4 K 0 4 2
C 2 2 C 38/54		C 2 2 C 38/54	
C 2 3 C 8/22		C 2 3 C 8/22	

審査請求 未請求 請求項の数24 O L (全 24 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2002-135274(P2002-135274)

(22) 出願日 平成14年5月10日 (2002. 5. 10)

(71) 出願人 000001236

株式会社小松製作所

東京都港区赤坂二丁目3番6号

(72) 発明者 高山 武盛

大阪府枚方市上野3丁目1-1 株式会社

小松製作所生産技術開発センタ内

(74) 代理人 100097755

弁理士 井上 勉

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高硬度高韧性鋼およびその鋼材を使用した装軌部品、耐土砂摩耗部品、締結ボルト、高韧性歯車、高韧性高耐面圧歯車、耐摩耗鋼板

(57) 【要約】

【課題】 Si、Al、Cr、Mo、V、W、Ni、Coをより適正に添加し、600℃以上の高温焼戻しによって硬さHRC50以上でそのシャルピー衝撃値が5 kg・m/cm²以上となる高硬度高韧性鋼を提供する。

【解決手段】 少なくともC:0.15~1.2重量%、Si:0.05~1.8重量%を含有する鋼において、Siの一部を0.15~1.6重量%のAlで置き換えるとともに、0.3~2.5重量%のNiが添加され、さらに、Cr:0.1~3.5重量%、Moが0.1~1.7重量%の範囲で、かつ式Mo(重量%)=1.7-0.5×(Si(重量%)+Al(重量%))の関係を上限として添加されるとともに、V:0.05~0.40重量%、W:0.1~1.0重量%のいずれか一方もしくは両方が添加され、さらにMn、Co、Cu、Ti、B、Nbの一種以上の合金元素と、P、S、N、O等の不可避不純物元素が含有され、残部が実質的にFeからなる焼戻しマルテンサイト鋼である。

【特許請求の範囲】

【請求項1】 少なくともC:0.15~0.60重量%、Si:0.05~1.8重量%、Cr:0.1~3.5重量%を含有する鋼において、Moが0.1~1.7重量%の範囲で、かつ式 $Mo(重量\%) = 1.7 - 0.5 \times Si(重量\%)$ の関係を上限として添加されるとともに、V:0.10~0.40重量%、W:0.1~1.0重量%のいずれか一方もしくは両方が添加され、さらに、Mn、Ni、Co、Cu、Al、Ti、B、Nb、Zr、Ta、Hf、Caの一種以上の合金元素と、P、S、N、O等の不可避の不純物元素が含有され、残部が実質的にFeからなる焼き入れ焼戻しマルテンサイト鋼であることを特徴とする高硬度高靱性鋼。

【請求項2】 Si:0.8~1.60重量%、Cr:0.1~1.0重量%未満、Mo:0.5~1.3重量%に制限され、Bが0.0005~0.005重量%添加される請求項1に記載の高硬度高靱性鋼。

【請求項3】 式 $26.2 \leq 5.8 \times (Si(重量\%) + Al(重量\%)) + 2.8 \times Cr(重量\%) + 11 \times Mo(重量\%) + 25.7 \times V(重量\%) + 7.5 \times W(重量\%) \leq 36.2$ の関係に合金添加量が調整される請求項1~3のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼。

【請求項4】 少なくともC:0.10~1.20重量%、Si:0.05~1.8重量%を含有する鋼において、Siの一部を0.15~1.6重量%のAlで置き換えるとともに、0.3~2.5重量%のNiが添加され、さらに、Mn、Cr、Mo、V、W、Co、Cu、Ti、B、Nb、Zr、Ta、Hf、Caの一種以上の合金元素と、P、S、N、O等の不可避の不純物元素が含有され、残部が実質的にFeからなる焼き入れ焼戻しマルテンサイト組織鋼であることを特徴とする高硬度高靱性鋼。

【請求項5】 Crが0.1~3.5重量%の範囲で含有されている請求項4に記載の高硬度高靱性鋼。

【請求項6】 Moが1.7重量%未満の範囲で、Si、Alの添加に対して、式 $Mo(重量\%) = 1.7 - 0.5 \times (Si(重量\%) + Al(重量\%))$ の関係を上限として添加される請求項4または5に記載の高硬度高靱性鋼。

【請求項7】 V:0.05~0.40重量%、W:0.1~1.0重量%のいずれか一方もしくは両方が添加される請求項4~6のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼。

【請求項8】 Al:0.15~0.75重量%、Ni:0.3~2.0重量%に制限されることと、Bが0.0005~0.005重量%添加されることのいずれか一方もしくは両方を特徴とする請求項4~7のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼。

【請求項9】 式 $21.2 \leq 5.8 \times (Si(重量\%) + Al(重量\%)) + 2.8 \times Cr(重量\%) + 11 \times Mo(重量\%) + 25.7 \times V(重量\%) + 7.5 \times W(重量\%) \leq 41.2$ の関係に合金添加量が調整される請求項4~8のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼。

o(重量%) + 25.7×V(重量%) + 7.5×W(重量%) ≤ 41.2の関係に合金添加量が調整される請求項4~8のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼。

【請求項10】 少なくともC:0.25~0.55重量%、Si:0.8重量%未満、Cr:3.5~5.5重量%を含有する鋼において、Moが0.3~1.0重量%の範囲で添加されるとともに、V:0.10~0.40重量%、W:0.1~1.0重量%のいずれか一方もしくは両方が添加され、さらにMn、Ni、Co、Cu、Al、B、Ti、Nb、Zr、Ta、Hf、Caの一種以上の合金元素と、P、S、N、O等の不可避不純物元素が含有され、残部が実質的にFeからなる焼き入れ焼戻しマルテンサイト組織を有することを特徴とする高硬度高靱性鋼。

【請求項11】 0.15~1.0重量%のAlと0.3~2.5重量%のNiが添加され、焼戻し軟化抵抗性と靱性を改善したこと特徴とする請求項10に記載の高硬度高靱性鋼。

【請求項12】 式 $21.2 \leq 3 \times (Si(重量\%) + Al(重量\%)) + 2.8 \times Cr(重量\%) + 11 \times Mo(重量\%) + 25.7 \times V(重量\%) + 7.5 \times W(重量\%) \leq 41.2$ の関係に合金添加量が調整される請求項11に記載の高硬度高靱性鋼。

【請求項13】 1~20重量%のCoが添加されている請求項1~12のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼。

【請求項14】 Nb、Ti、Zr、Ta、Hfの一種以上が総量で0.005~0.2重量%含有されている請求項1~13のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼。

【請求項15】 焼き入れ処理後に600℃以上の温度での高温焼戻しを施すことにより、硬さHRC50~60で、シャルピー衝撃値5kgf・m/cm²以上となる請求項1~14のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼。

【請求項16】 焼き入れ処理後に焼戻し処理を施した焼戻しマルテンサイト鋼において、その硬さがHRC45以上で、HRC45~55の硬さ範囲で式 $\log(\text{シャルピー衝撃値kgf} \cdot \text{m/cm}^2) \geq -0.0263 \times \text{HRC} + 2.225$ の関係を満足するとともに、HRC55以上においてはシャルピー衝撃値が6kgf・m/cm²以上であることを特徴とする請求項1~14のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼。

【請求項17】 請求項1~16のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼であって、硬さがHRC52以上で、かつ、シャルピー衝撃値が6kgf・m/cm²以上である焼入れ焼戻しマルテンサイト鋼を用いた装軌式車両の履帯ブッシュ、履帯リンク、履帯用上下転輪ローラ、履帯シューであることを特徴とする装軌部品。

【請求項18】 請求項1~16のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼であって、硬さがHRC50以上で、かつ、シャルピー衝撃値が8kgf・m/cm²以上である焼入れ焼戻しマルテンサイト鋼を用いたトンネル掘削

用シャंक、トンネル掘削用ディスクカッター、チゼル工具、土質改良用攪拌ブレード等であることを特徴とする耐土砂摩耗部品。

【請求項19】 請求項1～16のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼であって、硬さがHRC40以上で、かつ、シャルピー衝撃値が式 $\log(\text{シャルピー衝撃値 } \text{kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2) \geq -0.0263 \times \text{HRC} + 2.225$ の関係を満足する焼入れ焼戻しマルテンサイト鋼を用いたことを特徴とする建設機械に用いられる締結ボルト。

【請求項20】 請求項1～16のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼を歯車形状に加工した後に、浸炭焼入れ焼戻し処理によって、表面炭素濃度が0.6～1.0重量%で、表面浸炭深さが0.4mm以上で、その硬さがHRC55～64に調整され、等価深さを持つシャルピー試験片の衝撃値が $8 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ 以上であることを特徴とする高靱性歯車。

【請求項21】 請求項1～16のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼を歯車形状に加工した後に、表面炭素量が0.8～1.3重量%となるように浸炭した後、一旦A1変態温度以下に冷却し、さらに、再加熱焼入れ焼戻し処理を施し、表面浸炭硬化層深さが0.4mm以上で、その硬化層中に平均粒径が $1 \mu\text{m}$ 以下のセメンタイトを分散させ、その硬さがHRC59～65に調整され、その等価深さを持つシャルピー試験片の衝撃値が $4 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ 以上であることを特徴とする高靱性高耐面圧歯車。

【請求項22】 請求項1～16のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼を歯車形状に加工した後に、高周波焼入れ焼戻しを施し、表面硬さがHRC52～64に調整され、その硬化深さが等価なシャルピー試験片の衝撃値が $5 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ 以上であることを特徴とする高靱性歯車。

【請求項23】 請求項1～16のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼を焼入れ焼戻し処理によって、 $50 \text{ kgf} / \text{mm}^2$ 以上の高張力および／またはHRC50以上の硬さに調整され、バケット、ブルドーザーブレード等に溶接して使用されることを特徴とする耐摩耗鋼板。

【請求項24】 Crを3.5重量%未満含有し、600℃の焼戻し処理によってHRC50以上となるように、式 $26.2 \leq 5.8 \times (\text{Si (重量\%)} + \text{Al (重量\%)} + 2.8 \times \text{Cr (重量\%)} + 11 \times \text{Mo (重量\%)} + 25.7 \times \text{V (重量\%)} + 7.5 \times \text{W (重量\%)}) \leq 41.2$ の關係に合金添加量が調整される請求項1～14のいずれかに記載の高硬度高靱性鋼を使ったことを特徴とするリップポイント、エンドビット、バケットツース、エッジ、トンネル掘削用ディスクカッター等土砂掘削用に用いられる耐土砂摩耗部品。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、油圧ショベル、ブルドーザ、ホイールローダ、モーターグレーダ、地下配管埋設機、土質改良機、コンクリート、木材等の破砕機、トンネル掘削機等の建設・土木用機械の掘削用刃先もしくは装軌式車両の履帯および減速機等に用いられる高硬度高靱性な耐摩耗用鋼や歯車用鋼およびその部材に関するものである。

【0002】

【従来の技術】従来、建設・土木用機械に広く用いられている耐摩耗用鋼としては、SMnB、SCr、SCrB、SCM、SNCM系の中炭素添加鋼に焼入れ焼戻し等の熱処理を施したものがある。例えば、装軌式車両の履帯を構成する履帯ブッシュ、履帯シュー、履帯リンク、転輪ローラ、スプロケット等は走行時の摩耗や車体荷重が衝撃的に作用することから、炭素量の低減による靱性の確保を考慮した耐摩耗性の適正化がなされている。また、岩盤を割ったり、掘削するのに用いられる掘削刃先（リップポイント、バケットツース、カッティングエッジ等）では、高性能化への要求が大きく、より衝撃的な負荷による割れもしくは折損の発生を防ぐ靱性と、より高硬度化による耐摩耗性の改善が図られている。とりわけ、前記掘削刃先においては、岩盤との過酷な摩擦熱によってその刃先部近傍が約600℃にまで加熱されるため、焼戻し軟化抵抗性を向上させた高硬度高靱性鋼が多く用いられている。

【0003】また、前記建設・土木用機械は走行時ににおいて岩石や構造物等の障害物を乗り越えたり、旋回しながらそれら障害物を掘削することが多く、それら走行用、旋回用の歯車減速機の歯車が衝撃的な荷重による破損が問題になるために、低炭素な肌焼鋼に浸炭焼入れ焼戻し処理を施した歯車が使用されている。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】前記建設・土木機械の履帯部品や掘削刃先等はいずれも①衝撃的な負荷による割れもしくは折損が生じないような高靱性化と②土砂、岩石等に対する耐摩耗性に優れる高硬度化の両立が望まれるが、一般的に高靱性と高硬度は背反する特性であるために、まず、靱性を確保するために炭素添加量を低く抑え、焼入性を高める合金元素を適正に添加した鋼材（耐摩耗用鋼）を使い、焼入れ焼戻し処理を施して使用されているために、耐摩耗性が十分でない問題がある。

【0005】前記履帯を構成する耐摩耗部材はより靱性を重視する観点から、例えば履帯シュー：0.25～0.3重量%、転輪ローラ：0.3～0.35重量%、履帯リンク：0.35～0.4重量%、スプロケット：0.35重量%等と炭素量が低く設定されており、また、焼入れ焼戻し硬さがHRC45～52程度に調整されて使用されていることから、耐摩耗性の点では十分でない場合が多く、建設・土木用機械の履帯修理コストが高くなる問題がある。

【0006】また、前記履帯の履帯ブッシュは、構造的により耐摩耗性が重要視されるために、例えば高靱性のSCM420に浸炭焼入れ焼戻し処理を施して利用されているが、深い高硬度な浸炭硬化層を形成させるための浸炭処理が極めて長時間におよび、コスト的に高くなることと浸炭処理によって靱性が顕著の損なわれるために、破損しやすい問題がある。

【0007】また、トンネル掘削用のディスクカッターやシャンク等のようにより靱性を重視する部材においては、例えば、特許第3227730号公報に開示されるように、炭素添加量を低く抑え、かつ、Niを多量に添加した鋼材（例えば、SNCM625、SNCM630相当）を焼入れ焼戻してHRC45以上で、シャルピー衝撃値5kgf・m/cm²以上になる条件で利用されるが、その耐用性は硬さ、靱性両方の点で十分でなく、コスト的にも高価である問題がある。

【0008】また、岩石やコンクリートを破砕するジョークラッシャーの歯板でもより靱性を重要視するために、ハッドフィールド鋼をよく利用されているために、耐摩耗性が十分でない問題がある。

【0009】さらに、土質改良機や耕運機のように土砂を攪拌、微細化する攪拌機のカッター（ソイルカッター、ピン）においても、0.25～0.3重量%炭素量に抑制し、硬さがHRC48レベルに焼入れ焼戻されて利用されているために、耐摩耗性が十分でない問題がある。

【0010】さらに、前述のようにブルドーザ、ホイローダ、油圧ショベル、モーターグレーダ等の建設・土木機械を使って岩石を割ったり、掘削したりする掘削刃先（リップポイント、バケットツース、カッティングエッジ、エンドビット等）等やトンネル掘削用ディスクカッターでは岩盤との過酷な摩擦熱によって刃先部が300～600℃まで加熱されるため、はじめの硬さが顕著に軟化して耐摩耗性が十分でなくなる問題があり、使用する鋼材としては前記高靱性化と高硬度化だけでなく、約600℃にまで加熱されても十分な焼戻し軟化抵抗性が保有されることが望ましい。ところが、この焼戻し軟化抵抗性を改善するための合金元素の適正な添加方法（合金元素の選定とその添加量など）が不明確であるために、この合金元素の過剰添加による靱性の劣化などを防止できなかったり、あるいは経済的に高価になり易いといった問題点がある。

【0011】また、各種合金元素を添加した耐摩耗用鋼では、焼入れ後350～550℃の焼戻しで出現する「焼戻し脆性」を回避することが極めて困難であるために、十分な高靱性が得られないという問題点がある。

【0012】さらに、350～550℃の焼戻しで出現する「焼戻し脆性」がほとんど認められない炭素鋼では、十分な焼入れ性が確保できないために、高合金な耐摩耗用鋼に低P、低S化などの高純度鋼化を図ること

によってその「焼戻し脆性」の軽減が図られているが、この高純度鋼化を達成するには、より高価になって市場入手性に問題がある。

【0013】この種の耐摩耗用鋼に関する従来技術として、例えば特開昭55-12177号公報においては、C:0.25～0.40%、Si:1.5～2.5%、Mn:1.6%以下、Cr:3.0～5.0%、Mo:0.5～1.2%を含む耐摩耗鋼が提案されているが、この耐摩耗鋼においては、過剰なSi、Cr、Moの添加によって、かえって550℃以上での焼戻し硬さが急速に低下し、耐摩耗性の点においても十分でなく、しかも経済的ではないという問題点がある。

【0014】また、特開昭54-124816号公報においては、C:0.4～0.6%、Si:0.8～1.7%、Mn:0.4～0.8%、Cr:0.6～2.0%、Mo:0.1～0.8%、Al:0.2～1.0%を含む耐摩耗鋼が提案され、特開昭54-143715号公報においては、C:0.4～0.6%、Si:0.8～1.7%、Mn:0.4～0.8%、Cr:0.6～2.0%、W:0.1～0.5%、Al:0.2～1.0%を含む耐摩耗鋼が提案されているが、これらはいずれも焼戻し軟化抵抗性とその靱性が十分でない。

【0015】さらに、特開昭59-107066号公報においては、C:0.4～0.6%、Si:1.6～2.2%、Mn:0.5%以下、Cr:1.0～1.5%、Mo:0.8～1.2%、V:0.2～0.5%、Ni:1.0～2.0%を含む耐摩耗鋼が提案されているが、この耐摩耗鋼においては、焼戻し軟化抵抗性と別に、過剰なMo、Vの添加によりその靱性が十分でないという問題点がある。

【0016】また、特開昭60-215743号公報においては、C:0.35～0.45%、Si:0.6～1.5%、Mn:1.8%以下、Cr:2.5～4.5%、Mo:0.2～1.0%および／またはV:0.01～0.5%、Nb:0.01～0.10%、W:0.01～0.5%の一種以上、さらにTi:0.01～0.10%、B:0.0005～0.0030%を含む耐摩耗鋼が提案されているが、この耐摩耗鋼においては、Crを添加し過ぎることによって、Si添加による焼戻し軟化抵抗性が減じるとともに、靱性低下が避けられないという問題点がある。

【0017】さらにまた、特開平5-78781号公報においては、C:0.35～0.55%、Si:0.5%以下、Mn:0.5%以下、P:0.015%以下、S:0.010%以下、Cr:1.00～2.5%、Mo:1.00～2.00%、V:0.05～0.30%、B:0.0003～0.0050%、Al:0.005～0.10%、Nb:0.01～0.20%を含む耐摩耗鋼が提案されており、低Si化による焼戻し軟化抵抗性低下分を高Mo化、V添加で補っているが、焼戻

し軟化抵抗性が十分ではない。また、韌性確保のために、低P化、低S化および低Mn化による粒界強化を図っているが、一般的に高価で、市場入手性に問題があるとともに、韌性においても十分でないという問題点がある。

【0018】前記建設・土木用機械の走行用および旋回用の歯車減速機の歯車が衝撃的な荷重による破損を防止するために、高韌性な低炭素肌焼鋼(0.1~0.25重量% C)に浸炭焼入れ焼戻し処理を施した歯車を使用されているが、表面に浸炭硬化層が深く形成されるにしたがって急激に韌性が悪くなり、とりわけ、耐面圧強度や歯元曲げ疲労強度の観点から0.5mm以上に浸炭硬化層を形成させる必要性のある前記歯車では韌性が改善されない問題がある。また、低炭素肌焼鋼においても、低P化、低S化による粒界強化を図っているが、一般的に高価で、市場入手性に問題があるとともに、韌性においても十分でないという問題点がある。

【0019】本発明は、このような問題点を解消するためになされたもので、Si、Al、Cr、Mo、V、W、Ni、Coをより適正に添加し、600℃以上の高温焼戻しによって硬さHRC50以上でそのシャルピー衝撃値が5kgf・m/cm²以上となる高硬度高韌性鋼を提供することを目的とするものである。

【0020】さらに本発明は、AlとNiを複合添加することによって、高炭素高硬度な焼入れ焼戻しマルテンサイト鋼においても高韌性を可能とする鋼を提供することを目的とするものである。

【0021】またさらに本発明は、これらの鋼に適正な熱処理を施すことによって、高硬度高韌性な各種耐摩耗部材、歯車部材、ボルト部材を提供することも目的としている。

【0022】

【課題を解決するための手段および作用・効果】本発明においては、まず、前記掘削刃先等が摩擦熱によって600℃に加熱されることと、550℃以上の焼戻し処理によって焼入れ鋼の焼戻し脆性を避け、韌性が回復されることの共通性に着眼し、焼入れ後、550℃以上、好ましくは600℃の焼戻し処理によってもHRC45以上(好ましくはHRC50以上)の十分な硬さを得るための炭素量、各種合金元素の選定(C、Si、Al、Cr、Mo、V、W)とその添加量の適正化および後述するような合金元素間の相互作用を考慮した適正化を図り、必要以上の合金元素添加による脆性劣化を防止し、かつ、経済性を確保することを図った。

【0023】さらに、Alが焼戻し軟化抵抗性を顕著に高めるとともに、AlとNiとを複合添加によって前記焼戻し脆性を示すことなく、低温の焼戻し処理によっても韌性が顕著にされることを見出し、また、1.2重量%までの炭素添加量範囲においてシャルピー衝撃値が5kgf・m/cm²以上の高韌性を示し、高硬度で高韌

性な焼戻しマルテンサイト組織鋼を使った前記各種耐摩耗部材の耐摩耗性の改善を図った。

【0024】またさらに、高温焼戻し脆性を回避して高韌性を得るために、焼入れ焼戻しマルテンサイトの磁気変態温度を高めるCoを適量添加することによって韌性を損なうことなく、高温焼戻しによる軟化抵抗性をより改善した。

【0025】本発明において、鋼中の各合金成分の含有量(重量%)の限定理由は下記のとおりである。これは、後述の実施例にて示されるように、各種耐摩耗鋼を200~700℃で焼戻しした硬さデータを解析した結果に基づいて得られたものである。

【0026】C:0.10~1.2重量%

各種炭素量を含有する焼入れ鋼に200℃の低温焼戻しを施した後の硬さを調査した結果、HRC45以上を確保する下限の炭素量が0.15重量%であり、かつシャルピー衝撃値として5kgf・m/cm²以上が確保される上限の炭素量がほぼ0.60重量%であるが、さらに、AlとNiが複合添加された本発明鋼における上限炭素含有量が1.20重量%であり、かつ、本発明鋼を前記浸炭歯車などに利用する場合を想定した場合の下限炭素量が0.1重量%であることから、本発明の炭素含有量を0.1~1.2重量%とした。

【0027】また、前記のように焼戻し軟化抵抗性が重要となる部材に用いる高硬度高韌性鋼については、0.25~0.55重量%炭素を含有するが、合金元素をほとんど含有しない鋼においては、400~600℃焼戻し状態での硬さは炭素量にあまり影響されない(0.55重量%炭素以上では500℃でΔHRC=+2.5、600℃でΔHRC=+1.0となる)、合金元素の添加による400~600℃焼戻し処理による硬さと基準とする炭素鋼の硬さの差を合金元素添加による焼戻し軟化抵抗量(硬さ上昇量)として解析した。また、600℃焼戻しによってHRC45以上の硬さを得るためには炭素含有量は0.25重量%以上であることが好ましい。

【0028】また、焼戻し軟化抵抗性を高めるために、後述するMo、V等の合金元素を積極的に添加する高硬度高韌性鋼においては、0.60重量%以上に炭素量が增大すると、焼入れ加熱時におけるオーステナイト相域での焼戻し軟化抵抗性に寄与する合金元素の固溶量が低下し、焼戻し軟化抵抗性に寄与する合金元素の役割が減ずることからあまり経済的でないこと、さらには焼戻しマルテンサイト中における炭化物の増量、粗大化によって韌性が劣化することから好ましくない。

【0029】さらに、炭素はオーステナイトを顕著に安定化させる元素であり、後述のようにフェライトを安定化させるSi、Al、Moを多量に添加する本発明鋼においては、焼入れ温度を950℃以下に抑えるために、少なくとも0.10重量%以上の炭素を添加することが

好ましく、また、焼き入れ温度を低くすることができるオーステナイト安定化元素であるMn、Ni、Crの添加量を抑える観点からは炭素含有量は0.10重量%以上がより好ましい。

【0030】Si:0.05~2.5重量%

Siは不可避免的に製鋼中に含有されるものであり、通常、0.05~0.3重量%含有されているが、本発明では、セメンタイトの析出を抑制し、約400℃以下での焼戻しによる靱性向上に寄与するとともに、焼戻し軟化抵抗性をより高める元素として2.5重量%未満までの添加を許容した。このSiの添加量は0.3重量%未満ではその効果が顕著でなく、また約4重量%までは焼戻し軟化抵抗性を高めることが知られているが、Siが α Fe相を安定化してA3変態温度を高め、焼入れ温度を高め過ぎない範囲でその添加量が決められるべきであることから、炭素量が0.1~0.35重量%の範囲で、浸炭焼入れ焼戻し処理を施して使用する歯車部材に適用する場合には、2.5重量%以下に抑制することが好ましく、より好ましくは後述のMo、Vに対するSi添加の影響を考慮して1.8重量%である。

【0031】また、Siの添加は後述のMoが有効に作用する最大添加量(YMo重量%)を、 $YMo = 1.7 - 0.5 \times Si \text{ 重量\% (at } 950^\circ\text{C)}$ の関係式で減じ、Si添加量に応じてMo添加を有効添加量以下にすることが好ましいことがわかった。

【0032】SiとVとの関係においてもMoと同様の相互作用が認められ、1.8重量%Si以上のVの有効最大添加量(YV)は925℃では0.15重量%、それ以下では0.3重量%であり、950℃ではそれぞれ0.2重量%、0.4重量%であった。なお、本発明では、Siと同様に鋼のフェライト相を安定化するAlも含有することから、 $Al + Si \leq 1.8 \text{ 重量\%}$ として、いたずらに焼入れ処置温度を高めるのを避けるものとした。

【0033】さらに、Si添加による400℃以上での焼戻し軟化抵抗性は、Crが3.5重量%以上共存する場合顕著に減退させられることから(600℃では約1/2に減退する)、3.5重量%以上のCrとSiの複合添加は効果的でないことがわかった。これは、Crの増量によってSiのセメンタイト析出抑制効果が減退されることによる。

【0034】また、Crが3.5重量%以上共存する場合、焼戻し軟化抵抗性を高めるのに有効に作用する上限のMo添加量が約1/2に減ずるので、その有効添加量以上のMoの添加は靱性を損なうことが明らかである。

【0035】Al:0.15~1.6重量%

Alは脱酸作用が極めて強力であり、また鋼中の窒素とAlNを形成して結晶粒の微細化に作用することが知られており、通常のキルド肌焼き鋼においては0.005~0.05重量%の範囲で添加されている。鋼中に固溶

するAlは粒界への偏析傾向が強く、かつ粒界強度を劣化させる不純物元素P、Sを粒界から強力に排斥するとともに、粒界靱性を改善するNiを強力に引き寄せる作用をすることから、本発明では、AlとNiを積極的に同時添加してより高濃度な炭素を含有し、HRC45以上の高硬度な焼戻しマルテンサイト組織鋼の靱性を画期的に改善する。また、AlとNiを積極的に同時添加することによって、従来350℃以上の焼戻しで発現する焼戻し脆性が防止される。またさらに、前記高硬度な焼戻しマルテンサイト組織鋼の靱性を画期的に改善することは、単に衝撃的な荷重に耐えるだけでなく、粒界破壊を画期的に防止することにつながるが良く知られており、この特性を利用して、例えば後述するような履帯シューボルト等の高張力ボルト類や履帯ブッシュと履帯ピンを圧入して使用される履帯リンクアッセンの履帯ブッシュ、履帯リンクの耐遅れ破壊性の画期的な改善を図ることができる。

【0036】さらに、後述のMo、Vが400℃以上での高温側の焼戻し軟化抵抗性を高めるのに対してAlはSiと同様に、400℃以下の低温側での焼戻し軟化抵抗性とそれ以上の高温側の焼戻し軟化抵抗性の両方を高めることに有効であることを見出し、前記 $Al + Si \leq 1.8 \text{ 重量\%}$ を維持しながら随時添加できるものとするが、靱性の改善からはAlの添加量範囲は0.15重量%以下ではその効果が十分でなく、また1.6重量%以上ではいたずらにA3温度を高めることとその靱性改善効果が飽和するため、0.15~1.6重量%とする。なお、前記と同様に炭素量を低く抑えた歯車部材に適用する場合には、焼き入れ温度950℃において、 α Fe相が共存しないように1.2重量%以下とするのが好ましい。

【0037】また、AlはNiと共存する際においては、後述するように時効硬化性の発現が更なる焼戻し軟化抵抗性を高める作用をする(1Al-1Niで $\Delta HRC = +4$, at 600℃)ことから、耐摩耗性の観点からは好ましいことである。

【0038】Ni:0.3~2.5重量%

Niは焼入れ性を高めるとともに、低温焼戻しマルテンサイト鋼の靱性を向上させる元素として、例えばSNCM肌焼き鋼やAIS14340強力鋼などにおいては3.5重量%以下の範囲で添加されている。また、トンネル掘削用のシャंक鋼材には(特許第3227730号)、2.5~4.0重量%のNiを添加した焼き入れ焼戻し材料が利用されている。

【0039】本発明では、前記0.3~2.0重量%のAlとNiの複合添加を必須にしてより効果的に靱性向上に寄与させることから、Ni添加の下限量を0.3重量%とした。また、このNiの上限量は、NiとAlの複合添加によるNiAl金属間化合物の析出による焼戻し軟化抵抗性を高め、耐摩耗性を改善するが、過剰な添

加は韌性をかえって損なうとともに経済的に不利であることから2.5重量%が上限添加量として好ましい。

【0040】また、Al、Siは強力なフェライト安定化元素であるために、それらを高濃度に添加するとAc3温度がより高温側に移行して焼入れ温度が高くなる問題がある。例えば図1に示されるように、Fe-3重量%Si-C合金のAc3温度線に対する各種合金元素影響から、低炭素側(0.10重量%~)の合金鋼ほど、Mn、Ni、Crを添加して焼入れ温度を低く抑えることが熱処理コスト的に好ましく、0.4重量% C付近でも1重量%程度のMnやNiを添加することが好ましいことがわかる。

【0041】Mn:0.3~3.0重量%

Mnは顕著な脱硫作用を示すだけでなく、鋼の焼入れ性を向上させる有効な元素であるとともに、Niと同様に鋼のオーステナイト相を強力に安定化させてAc3変態温度を降下させ、焼入れ温度を低下させるのに有効な元素である。また、前記フェライト安定化元素であるAl、Siの添加によるAc3変態温度の上昇を抑制する有効な元素であるので、本発明では、共析温度に対するMn、Ni、Si、Alの影響から、近似的な $(Si + 2 \times Al) \approx (Ni + Mn)$ の関係 considering、3.0重量%以下とし、これによって焼入れ温度が950℃以上にならないように抑え、旧オーステナイト結晶粒がASTM粒度番号8を越えて粗大化しないようにすることが熱処理コスト的に好ましい。

【0042】Cr:0.1~3.5重量%

Crは鋼の焼入れ性を向上させるとともに、焼戻し軟化抵抗性を高める元素であるが、Mo、V、W等比べてその硬化程度は少ない。また、共存する炭素量の約7.5倍を越えると、Cr添加量(重量%)当たりの前記高温側の焼戻し軟化抵抗性が減少するとともに、Si、Alの前記高温側の焼戻し軟化抵抗性を減ずる作用があるために、Si、Alの前記高温側の焼戻し軟化抵抗性を利用する鋼に対しては、Cr添加の最大量は炭素量の7.5倍以下とした。より具体的には、0.55重量% Cに対して3.5重量% Cr、0.45重量% Cに対して2.9重量% Cr、0.35重量% Cに対して2.3重量% Cr、0.25重量% Cに対して1.6重量% Crとする。これ以上のCrを添加する場合においては、後述のMo有効添加量を約1/2に減ずることを考慮して合金設計がなされるべきである。

【0043】また、Crの焼戻し軟化抵抗性は5.5重量%以上において約1/2に減少するので、合金設計的手段としては次の2通りが考えられる。

①Cr添加量を3.5重量%以下に抑えて、Si、Al、Mo、V、Wを調整する方法

②Cr添加量を3.5~5.5重量%の範囲に設定した上で、Siの添加量を0.5重量%以下、Moの有効添加量範囲(~1.0重量%)にして、Al、V、Wを調

整する方法(1.0重量%以上のMoの添加は焼戻し軟化抵抗性を高めることには有効に寄与しない。)

【0044】前記①の方法では、コスト的にもCrの最大添加量を3.5重量%未満に留めておくことがより望ましいし、Crの焼戻し軟化抵抗性がさほど大きなものでないことから、Crの下限添加量は鋼の焼入れ性を高めることを考慮し、0.1重量%以上含有されることが好ましい。しかし、Crがセメンタイトの析出を顕著に促進し、約350℃以上の焼戻しで発現する焼戻し脆性を顕著に高めるために、1重量%未満に抑えることが韌性の観点からはより好ましい。

【0045】また、前記②の方法では、3.5重量%以上のCrを添加する鋼においては、Si添加を少量にし、かつMoを前記有効添加量以下の範囲で添加し、さらに焼戻し軟化抵抗性を顕著に高めるV、Wの添加によって焼戻し軟化抵抗性を高めるのが好ましい。例えば熱間工具鋼SKD6(C:0.32~0.42%、Si:0.8~1.2%、Mn:0.5%以下、Cr:4.5~5.5%、Mo:1.0~1.5%、V:0.3~0.5%)相当の600℃焼戻し硬化を達成する成分として、Si:0.5重量%以下、Cr:3.5~5.5重量%、Mo:0.3~1.0重量%、V:0.2~0.4重量%、W:0.1~0.8重量%およびまたはこれにAl:0.15~0.6重量%、Ni:0.3~1.5重量%を添加したものを利用するのが好ましい。

【0046】Mo:0.1~1.9重量%

Moは焼入れ性を向上させ、かつ低温焼戻しマルテンサイト鋼における韌性を高める元素であるとともに、前述のように焼戻し軟化抵抗性を高める元素である。このため、有効な焼戻し軟化抵抗性が現れる0.1重量%を下限値とし、上限値は、焼入れ温度でのMoが焼入れ軟化抵抗性に作用する最大添加量(YMo重量%)となるが、Mo炭化物の固溶限との関係に基づき、Si、Alを含有しない場合には $YMo = 1.6 (900^\circ\text{C})$ とし、Si、Alが共存する場合には $YMo = 1.6 \text{重量}\% - 0.5 \times (\text{Si重量}\% + \text{Al重量}\%)$ とする。ただし、定数1.6重量%は焼入れ温度に対して変化するもので、900℃では1.6、950℃では1.9、1000℃では2.3が適正である。なお、焼入れ設備やその生産性および加熱時の結晶粒成長による結晶粒の粗大化を考慮した場合には、焼入れ温度は950℃以下に設定するのが好ましく、900℃以下がより好ましい。

【0047】また、600℃における焼戻し軟化抵抗性に対する寄与度は、Si、Alが1重量%当たりHRC=+5.8であるのに対し、MoはHRC=+11である。このため、前記YMoの関係式から、Si、Alを最大限に有効利用することによって、焼戻し軟化抵抗性をさほど減じることなく、Mo添加量を低減できることがわかったので、本発明では、経済的な観点からMoの最大添加量を1重量%未満に設定することが好ましい。

【0048】また、前述のように3.5重量%以上Crが共存する場合においては、有効な最大添加量(YMo重量%)がさらに1/2ほどに減じることから、3.5~5.5重量%Crを含有する鋼に対しては、Moを1重量%以下にするのが好ましい。

【0049】V:0.05~0.4重量%

VはCr、Moと異なり、600℃以上の焼戻し温度域においても焼戻し軟化抵抗性を顕著に高め、耐摩耗性を高めるのに有効な元素であるため、本発明においては、VおよびVと同様の作用を示す後述のWのいずれかを含有することを必須としているが、V炭化物の固溶度が小さく、焼入れ温度での加熱時にV炭化物がオーステナイト相中に析出して、靱性を劣化させるために、その上限添加量を0.3重量%とするのが好ましい。なお、この上限添加量は、前記と同様、焼入れ温度が950℃のときは0.4重量%、1000℃のときは0.5重量%とするのが適正である。

【0050】また、Si、Alと共存するとき、(Si+Al)が1.8重量%以上の場合には、上限添加量を、前記焼入れ温度に応じた上限添加量のそれぞれ1/2に相当する0.15重量%、0.2重量%、0.25重量%とした。この焼入れ温度は、焼入れ設備やその生産性、および加熱時の結晶粒成長による結晶粒の粗大化を考慮した場合には950℃以下に設定するのが好ましいことから、添加量の上限を0.4重量%とした。なお、この焼入れ温度は900℃以下がより好ましいことから、添加量の上限は0.3重量%であるのがより好ましい。さらに、1.0重量%以上の添加によって、Siが共存する場合において、Siの焼戻し軟化抵抗性を減ずることから、最大添加量を0.4重量%以下にするのが好ましい。

【0051】W:0.1~1.0重量%

Wは前記Mo、Vほどの焼戻し軟化抵抗性はないが、600~700℃において最大の焼戻し軟化抵抗性を示すことと、有効作用する添加量の上限値(YW)が大きいことから、WとVのいずれかが含有されることが必須である。W添加量は0.1重量%以上においてその効果が有効になり、V、Moと同様、有効作用する上限値は900℃で0.8重量%、950℃で1.7重量%、1000℃で2.5重量%となる。Wを1重量%以上添加した場合には、Moの焼戻し軟化抵抗性を顕著に減じること、およびWがMoに比べて高価な材料であることから、その最大添加量を1.0重量%以下にするのが好ましい。

【0052】Co:1~20重量%

Co自身は焼戻し軟化抵抗性を発現する元素でないことは良く知られている。本発明では、Coの添加によってマルテンサイトの磁気変態点を急速に高め、他の合金元素の拡散性を抑えることによって、例えばSi、Al、Cr、Mo、V、Wの焼戻し軟化抵抗性を生む各種炭化

物反応を高温側にまで引き上げる効果を発揮し、またSi、Alとの共存によって時効硬化性を発揮し、Alとの共存によってCoの磁気変態点がより効率的に高められる。このCoの適正な添加量としては、1重量%当たり18℃での磁気変態点上昇による効果が10重量%あたりまで認められ、それ以上の20重量%までは1重量%当たり10℃の上昇が認められた。しかし、それ以上では効果が飽和するとともに、高価になり過ぎる問題がある。なお、より効率的には10重量%以下に抑えて使用することが好ましい。

【0053】B:0.0005~0.0030重量%

Bは顕著な焼入れ性の向上を図る元素であり、多くの場合において、焼入れ性を向上させるMn、Cr、Mo等の合金元素量を低減できる経済的効果が期待されるだけでなく、高温焼戻し脆性を引き起こし易いCrの添加量を低減できるために、本発明では積極的に利用することが好ましい。Bの添加量としては、0.0005重量%以下ではその効果が得られず、また0.0030重量%を越えると、BNの析出によって靱性を劣化することが知られているので、その適正添加量は0.0005~0.0030重量%とした。

【0054】また、Bはオーステナイト結晶粒界にP、Sよりも強力に偏析し易く、Sを強力に偏析し易く、とりわけSを強力に粒界から排出し、粒界強度を改善するので積極的に利用するのが好ましい。

【0055】Zr、Nb、Ti:0.005~0.20重量%

Zr、Nb、Tiは、結晶粒を微細化する元素として良く知られており、通常の範囲内で添加されるものであるが、0.2重量%を越えると炭化物、窒化物の析出量が多くなり、靱性に対しても良くないことが知られている。

【0056】P、S:0.03重量%以下

P、Sは不可避の不純物元素として含有され、前記350~550℃での焼戻し脆性に関与する重要な元素であり、高純度鋼はこれらの元素を極力低減している。本発明においては、600℃以上での高温焼戻しの適用および/またはAl+Niの添加による焼戻し脆性の回避を図っているため、P、Sの最大含有量が0.03重量%を越えるものであっても良いが、より高靱性の安定化を考慮した場合には0.03重量%以下とするのが好ましく、さらに現状の製鋼技術でコスト的に問題とならない0.015重量%以下とするのがより好ましい。

【0057】前述の検討結果に基づき、第1発明による高硬度高靱性鋼は、Siによる焼戻し軟化抵抗性を効率良く利用しながら、強力な焼戻し軟化抵抗性を発現させるMo、V、Wを適正量添加した経済的な強靱性耐摩耗鋼であって、少なくともC:0.15~0.60重量%、Si:0.05~1.8重量%、Cr:0.1~3.5重量%を含有する鋼において、Moが0.1~

1. 7重量%の範囲で、かつ式 $Mo(重量\%) = 1.7 - 0.5 \times Si(重量\%)$ の関係を上限として添加されるとき、 $V: 0.10 \sim 0.40$ 重量%、 $W: 0.1 \sim 1.0$ 重量%のいずれか一方もしくは両方が添加され、さらにMn、Ni、Co、Cu、Al、Ti、B、Nb、Zr、Ta、Hf、Caの一種以上の合金元素と、P、S、N、O等の不可避不純物元素が含有され、残部が実質的にFeからなる焼戻しマルテンサイト鋼であることを特徴とするものである。

【0058】また、第2発明は、前記第1発明において、 $150^\circ C$ 以上で焼戻したより高硬度の鋼の靱性を改善するために、Cr添加量を1重量%未満に抑えたものであり、 $Si: 0.8 \sim 1.6$ 重量%、 $Cr: 0.1 \sim 1.0$ 重量%、 $Mo: 0.5 \sim 1.3$ 重量%に制限され、Bが $0.0005 \sim 0.005$ 重量%添加されるものとした点にある。

【0059】また、第3発明は、前記第1発明または第2発明の成分範囲において、各合金元素添加量を、式 $2.6.2 \leq 5.8 \times (Si(重量\%) + Al(重量\%)) + 2.8 \times Cr(重量\%) + 1.1 \times Mo(重量\%) + 2.5.7 \times V(重量\%) + 7.5 \times W(重量\%) \leq 36.2$ の関係に調整し、 $950^\circ C$ 以下の温度からの焼き入れ後、 $600^\circ C$ の焼戻し処理を施し、HRC50～60の硬さに調整されるようにしたことを特徴とする高硬度高靱性鋼である。

【0060】また、第4発明は、少なくとも炭素量を $0.1 \sim 1.20$ 重量%およびSiを $0.05 \sim 1.8$ 重量%含有する鋼において、Siの一部を $0.15 \sim 1.6$ 重量%のAlで置き換えると同時に、 $0.3 \sim 2.5$ 重量%のNiが添加され、さらに、Mn、Cr、Mo、V、W、Co、Cu、Ti、B、Nb、Zr、Ta、Hf、Caの一種以上の合金元素と、P、S、N、O等の不可避的な不純物元素が含有され、残部が実質的にFeからなる焼き入れ焼戻しマルテンサイト組織を持つことを特徴とする高硬度高靱性鋼である。

【0061】また、第5発明は、前記第4発明において、Crが $0.1 \sim 3.5$ 重量%の範囲内で含有されたことを特徴とするものである。

【0062】また、第6発明は、前記第4発明および第5発明において、Moが1.7重量%未満の範囲で、Si、Alの添加量に対して、式 $Mo(重量\%) = 1.7 - 0.5 \times (Si(重量\%) + Al(重量\%))$ の関係を上限として添加されるように構成することで、靱性を改善した強靱性耐摩耗鋼を提供するものである。

【0063】さらに、第7発明では、前記第4発明～第6発明において、 $0.05 \sim 0.40$ 重量%V、 $0.1 \sim 1.0$ 重量%Wのいずれか一方もしくは両方が添加され、より焼戻し軟化抵抗性を高めたことを特徴とするものである。

【0064】さらに、第8発明では、前記第4発明～第

7発明において、過剰なAl添加によるA3変態温度の上昇を適正化するために、Alが $0.15 \sim 0.75$ 重量%とし、Niを $0.3 \sim 2.0$ 重量%に制限されるとき、より焼入れ性を安価に高めるために、Bが $0.0005 \sim 0.005$ 重量%されることのいずれか一方もしくは両方が実施されることを特徴とするものである。

【0065】さらに、第9発明では、前記AlとNiが共存する成分範囲の強靱性耐摩耗鋼が $600^\circ C$ 以上の焼戻しによってHRC45～65が確保できるようにするために、各合金元素添加量を、式 $2.1.2 \leq 5.8 \times (Si(重量\%) + Al(重量\%)) + 2.8 \times Cr(重量\%) + 1.1 \times Mo(重量\%) + 2.5.7 \times V(重量\%) + 7.5 \times W(重量\%) \leq 41.2$ の関係に調整したものである。

【0066】次に、第10発明による高硬度高靱性鋼は、少なくともC: $0.25 \sim 0.55$ 重量%、Si: 0.8 重量%未満、Cr: $3.5 \sim 5.5$ 重量%を含有する鋼において、Moが $0.3 \sim 1.0$ 重量%の範囲で添加されるとき、 $V: 0.10 \sim 0.40$ 重量%、 $W: 0.1 \sim 1.0$ 重量%のいずれか一方もしくは両方が添加され、さらにMn、Ni、Co、Cu、Al、B、Ti、Nb、Zr、Ta、Hf、Caの一種以上の合金元素と、P、S、N、O等の不可避不純物元素が含有され、残部が実質的にFeからなる焼戻しマルテンサイト鋼であることを特徴とするものである。

【0067】さらに、第11発明は、前記第10発明において、Crを $3.5 \sim 5.5$ 重量%含有する鋼において、 $0.15 \sim 1.0$ 重量%のAlと $0.3 \sim 2.5$ 重量%のNiが添加され、Moが $0.3 \sim 1.0$ 重量%の範囲で添加されることを特徴とするものである。

【0068】さらに、第12発明は、前記第11発明において、式 $2.1.2 \leq 3 \times (Si(重量\%) + Al(重量\%)) + 2.8 \times Cr(重量\%) + 1.1 \times Mo(重量\%) + 2.5.7 \times V(重量\%) + 7.5 \times W(重量\%) \leq 41.2$ の関係に合金元素添加量が調整され、 $600^\circ C$ の焼戻しによってHRC45以上の硬さが確保されることを特徴とするものである。

【0069】また、第13発明は、前記第1発明～第12発明において、 $1 \sim 20$ 重量%のCoを添加することによって、焼戻しマルテンサイトの磁気変態温度を $200^\circ C$ 程度上昇させ、焼戻し過程での合金の拡散を顕著に遅らせ、これによって $600^\circ C$ 以上の焼戻しによっても顕著な軟化抵抗性が発現できるようにしたものである。

【0070】第14発明は、前記各発明において、焼入れのために高温で加熱する際の結晶粒の微細化を図るために、Nb、Ti、Zr、Ta、Hfの一種以上を総量で $0.005 \sim 0.2$ 重量%添加したものである。

【0071】また、第15発明は、前記各発明において、焼入れ処理後に $600^\circ C$ 以上の温度での高温焼戻しを施すことにより、硬さHRC50以上で、シャルビー

衝撃値 $5 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ 以上となる高硬度高靱性鋼を提供することにある。

【0072】また、第16発明は、前記各発明において、焼き入れ処理後に 150°C 以上の焼戻し処理を施すことにより、硬さが $\text{HRC} 45$ 以上に調整され、 $\text{HRC} 45 \sim 55$ の硬さ範囲において、シャルピー衝撃値が式 $\log(\text{シャルピー衝撃値}(\text{kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2)) \geq -0.0263 \times \text{HRC} + 2.225$ の関係を満足し、さらに、 $\text{HRC} 55$ 以上の硬さにおいて、シャルピー衝撃値が $6 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ 以上であることを特徴とするものである。

【0073】また、第17発明は、前記第1発明～第16発明の高硬度高靱性鋼であって、焼き入れ焼戻し後の硬さが $\text{HRC} 52$ 以上で、かつ、シャルピー衝撃値が $6 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ 以上とし、その耐摩耗部の耐摩耗性が平均で従来の1.2倍以上改善したことを特徴とする履帯ブッシュ、履帯リンク、履帯用上下転輪ローラ、履帯シューであることを特徴とする装軌部品である。また、これらの適用部品は、全体加熱後に水、水溶性焼入れ液、焼き入れ油等の適当な冷却媒体を使って焼き入れた後に $150^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$ で焼き戻されるが、各部品の耐摩耗部位を高周波加熱焼入れ、焼き戻す方法であっても良いことは明らかである。

【0074】なお、前記スルーハード化した履帯ブッシュおよび履帯リンクは、後述するように例えば0.6重量%炭素、1重量%A1、1重量%Niを含有する場合においても（図11参照）、 400°C 以下の焼戻し温度においても $\text{HRC} 55$ 以上の高い硬さを維持するとともに、極めて高いシャルピー衝撃値を示し、履帯リンクに履帯ブッシュを圧入した状態での履帯リンク、履帯ブッシュの耐遅れ破壊性が改善されることは明らかであり、従来浸炭焼入れ焼戻し法や内外径高周波焼入れ方法で製造される履帯ブッシュの熱処理に比べきわめて安価に製造される。また、素材調質処理後に下転輪ローラとの踏み面部を深く高周波焼入れしていた履帯リンクにおいても、安価な熱処理が可能となるだけでなく、下転輪ローラと衝撃的に当たる履帯リンク両端部での欠けが防止できることも明らかである。

【0075】また、第18発明は、前記第1発明～第16発明の高硬度高靱性鋼であって、焼き入れ焼戻し後の硬さが $\text{HRC} 50$ 以上で、かつ、シャルピー衝撃値が $8 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ 以上とし、平均で従来の1.2倍以上改善したことを特徴とするトンネル掘削用シャンク、トンネル掘削用ディスクカッター、チゼル工具、土質改良用攪拌ブレード等である耐土砂摩耗部品である。なお、これらの適用部品は、全体加熱後に水、水溶性焼入れ液、焼き入れ油等の適当な冷却媒体を使って焼き入れた後に $150^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ で焼き戻されるが、各部品の耐摩耗部位を高周波加熱焼入れ、焼き戻す方法であっても良いことは明らかである。また、コスト的にはNi添

加量を1重量%とすることが好ましい。

【0076】また、第19発明は、前記第1発明～第16発明の高硬度高靱性鋼であって、炭素量が0.30重量%以上で、焼き入れ焼戻し後の硬さが $\text{HRC} 40$ 以上で、かつ、シャルピー衝撃値が式 $\log(\text{シャルピー衝撃値}(\text{kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2)) \geq -0.0263 \times \text{HRC} + 2.225$ の関係を満足することを特徴とする履帯シューボルトおよび歯車減速機、スウィングサークル固定用ボルト類等の建設機械に用いられる締結ボルトである。なお、これらの適用部品は、全体加熱後に水、水溶性焼入れ液、焼き入れ油等の適当な冷却媒体を使って焼き入れた後に $150^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ で焼き戻されるが、ボルト山部位を高周波焼き入れ焼き戻す方法であっても良いことは明らかである。

【0077】また、第20発明は、前記第1発明～第16発明の高硬度高靱性鋼を歯車形状に加工した後に、浸炭焼入れ焼戻し処理によって、表面炭素濃度が0.6～1.0重量%で、表面浸炭深さが0.4mm以上で、その硬さが $\text{HRC} 55 \sim 64$ に調整され、等価深さを持つシャルピー試験片の衝撃値が $5 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ 、好ましくは $8 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ 以上であることを特徴とする歯車、履帯ブッシュおよび履帯シューボルト類等の高靱性歯車である。

【0078】また、第21発明は、前記第1発明～第16発明の高硬度高靱性鋼を歯車形状に加工した後に、表面炭素量が0.8～1.3重量%となるように浸炭した後、一旦A1変態温度以下に冷却し、さらに、再加熱焼入れ焼戻し処理を施し、表面浸炭硬化層深さが0.4mm以上で、その硬化層中に平均粒径が $1 \mu\text{m}$ 以下のセメントサイトを分散させ、その硬さが $\text{HRC} 59 \sim 65$ に調整され、その等価深さを持つシャルピー試験片の衝撃値が $4 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ 以上であることを特徴とする高靱性高耐面圧歯車である。

【0079】また、第22発明は、前記第1発明～第16発明の高硬度高靱性鋼を歯車形状に加工した後に、高周波焼入れ焼戻しを施し、表面硬さが $\text{HRC} 52 \sim 64$ に調整され、その硬化深さが等価なシャルピー試験片の衝撃値が $5 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ 以上であることを特徴とする高靱性歯車である。なお、この歯車は全体加熱後に水、水溶性焼入れ液、焼き入れ油等の適当な冷却媒体を使って焼き入れた後に $150^\circ\text{C} \sim 350^\circ\text{C}$ で焼き戻されるが、歯型部位を高周波焼き入れ焼き戻す方法であっても良いことは明らかであり、その際のシャルピー衝撃値も $5 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{cm}^2$ 以上であることを特徴とする。

【0080】また、第23発明は、前記第1発明～第16発明の高硬度高靱性鋼を焼入れ焼戻し処理によって、 $50 \text{ kgf} / \text{mm}^2$ 以上の高張力および／または $\text{HRC} 50$ 以上の硬さに調整され、バケット、ブルドーザーブレード等に溶接して使用されることを特徴とする耐摩耗鋼板であって、建設・土木機械のバケット、ブレード等

10

20

30

40

50

への溶接時の低温割れや再加熱による割れ感受性を改善した耐摩耗鋼板である。

【0081】また、第24発明は、前記各発明において、前記摩擦熱による焼戻し軟化抵抗性が重要になる掘削用刃先類に適用するものであって、Crを3.5重量%未満含有し、600℃の焼戻し処理によってHRC50以上となるように、式 $26.2 \leq 5.8 \times (Si(\text{重量}\%) + Al(\text{重量}\%)) + 2.8 \times Cr(\text{重量}\%) + 11 \times Mo(\text{重量}\%) + 25.7 \times V(\text{重量}\%) + 7.5 \times W(\text{重量}\%) \leq 41.2$ の関係に合金添加量が調整される請求項1～14のいずれかに記載の高硬度高韧性鋼を使ったことを特徴とするリッパポイント、エンドビット、バケットツース、エッジ、トンネル掘削用ディスクカッター等土砂掘削用に用いられる耐土砂摩耗部品である。

【0082】

【実施例】次に、本発明による高硬度高韧性鋼の具体的な実施例について、図面を参照しつつ説明する。

【0083】（実施例1：予備調査と予備実験）本実施例1においては、「鋼の熱処理」改訂5版、日本鉄鋼協会編（1985年、丸善株式会社発行）に記載されている各種の強靱鋼（マルテンサイト鋼）の焼戻し温度とロ＊

＊ ックウエル硬さとの関係を整理し、本発明における耐摩耗鋼の改善目標値を検討した。

【0084】この検討の結果、図2に示されているように、0.6重量%以下の炭素を含有するSCr、SCM、SNCMおよび高Si系の強靱鋼においては、600℃の焼戻しによってHRC45を越えるものはなく、SKD6（0.4C5Cr1.3Mo0.3V）においてその目標が達成できることがわかった。

【0085】図3、図4には、SUJ2、SKH9を含めた鋼の150～700℃の焼戻し硬さとシャルピー衝撃値との関係が示されている。このグラフから、シャルピー衝撃値が5kgf・m/cm²以上であるための上限の硬さが約HRC56であることがわかる。また、表1に示される組成の鋼を焼入れ後200℃2hrの焼戻しを実施したもののシャルピー衝撃値と炭素量との関係を調査した予備実験結果が図5に示されているが、炭素量0.55重量%以上においてシャルピー衝撃値が5kgf・m/cm²以上になる可能性がほぼ無いことがわかる。

【0086】

【表1】

TP記号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	W	Ti	B
1	1.06	0.3	0.39	0.014	0.011	0.06	1.36	0.05				
2	0.94	0.28	1.01	0.01	0.014	0.05	0.59	0.04		0.56		
3	0.88	0.22	1.72	0.011	0.007	0.06	0.1	0.22				
4	0.76	0.21	0.3	0.007	0.005	1.59	0.07	0.02				
5	0.59	1.56	0.78	0.009	0.012	0.05	0.29	0.4	0.15			
6	0.58	1.2	0.73	0.014	0.014	0.07	0.66	0.45			Nb:0.08	
7	0.55	0.29	0.35	0.015	0.016	3.02	1.36	0.33				
8	0.49	0.3	0.33	0.016	0.008	3.04	1.23	0.34				
9	0.36	0.25	1.43	0.021	0.019	0.05	0.12	0.05				
10	0.32	0.35	0.77	0.022	0.027	0.09	0.99	0.18				
11	0.26	0.31	0.56	0.015	0.005	1.83	0.62	0.23			Nb:0.05	
12	0.22	0.26	0.8	0.012	0.005	0.06	0.93	0.41				
13	0.18	0.24	0.71	0.018	0.018	0.06	0.94	0.18				
14	0.4	2.36	0.38	0.009	0.018	0.05	0.9	0.01				
15	0.28	1.64	0.72	0.028	0.031	0.13	2.11	0.4	0.03		0.05	0.0018
16	0.26	0.29	0.76	0.011	0.014	0.47	0.44	0.18				

【0087】（実施例2：耐摩耗試験鋼の準備）表2には、本発明で使用した鋼材の組成が示されている。各種元素の添加範囲は、C：0.14～0.73重量%、Si：～2.5重量%、Mn：～1.3重量%、Cr：0.3～8重量%、Mo：～4重量%、V：～1重量%、W：～2重量%、Al：～2重量%、Ni：～2重量%で、その他Nb、B、Tiなどを微量添加、P、Sの調整等に関する水準を選択し、各合金元素の焼戻し軟

化抵抗性に対する影響（およびシャルピー衝撃値）を調査するのに用いた。なお、各鋼は、約25kgを高周波溶解炉により溶製し、熱間鍛造により直径32mmの丸棒状に成形した後、直径25mmの丸棒に機械加工し、適当な長さに切断したものに所定の熱処理を施して以下の実験に供した。

【0088】

【表2】

TPNo.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	W	B	Nb	Al	焼入れ温度 ℃	硬さHRC 200℃	シャルピー値 kg-m/cm ²	硬さHRC 600℃	シャルピー値 kg-m/cm ²
1	0.38	1.77	0.6	0.021	0.013	0.08	0.82	0.11			0.0026		0.015	870	51.20	3.10	38.40	8.20
2	0.35	1.68	1.21	-	-	-	0.53	1.04			0.0026		0.031	↑	51.90	5.28	45.90	6.90
3	0.36	1.68	1.2	-	-	-	0.51	1.05	0.11		0.0018		0.027	↑	51.50	6.10	48.60	7.12
4	0.31	0.24	1.23	-	-	-	0.31	1.82	0.41		0.0021		0.033	↑	50.20	6.80	51.00	7.10
5	0.42	0.23	0.72	-	-	1.51	0.71	1.32	0.31				0.041	↑	54.00	4.70	48.70	8.05
6	0.41	0.22	0.73	-	-		0.72	1.23	0.29	0.81			0.033	↑	55.00	7.45	53.70	8.39
7	0.41	0.21	0.58	-	-		1.58	0.38					1.28	↑	55.70	3.88	40.00	6.70
8	0.61	0.15	0.93	-	-		0.96	1.05	0.31	0.15			0.97	↑	60.00	7.11	45.00	15.1
9	0.58	0.18	1.11	-	-	1.51	0.88	0.51	0.21				1.25	↑	59.30	6.89	50.20	13.6
10	0.45	1.45	0.46	0.01	0.008		1.49	0.52	0.14		0.0018	0.049	0.029	↑	56.50	4.23	46.70	6.12
11	0.49	1.45	0.46	0.009	0.008		1.01	1.03	0.15		0.0019	0.053	0.031	↑	56.20	4.44	49.50	5.98
12	0.47	0.31	0.46	0.009	0.008		2.01	1.03	0.15		0.0019	0.051	0.027	↑	57.00	3.93	47.20	5.40
13	0.48	0.31	0.46	0.009	0.008		1.5	1.56	0.15		0.002	0.051	0.029	↑	57.00	3.56	49.20	4.80
14	0.49	0.29	0.45	0.008	0.007		1.5	1.49	0.23		0.0019	0.049	0.031	↑	56.40	4.56	49.30	4.50
15	0.46	1.54	0.4	0.007	0.007	0.01	1	0.31			0.002	0.034	0.05	↑	57.00	3.93	40.40	5.70
16	0.39	0.93	1.02	0.015	0.008	0.08	0.97	0.95	0.5				0.022	880	52.80	4.00	48.00	5.22
17	0.43	0.28	0.44	0.014	0.011	0.08	1.01	0.48			0.001	0.034	-	870	55.20		35.80	
18	0.47	0.25	0.4	0.008	0.009	0.01	1.01	1.05			0.0018	0.033	0.056	↑	56.30	3.93	41.30	7.13
19	0.44	1.44	0.44	0.012	0.008	0.05	0.98	0.49			0.0013	0.047	0.044	↑	57.30	4.27	40.40	6.88
20	0.45	0.24	0.4	0.012	0.007	0.03	1.02	0.48	0.31		0.0011	0.038	0.036	↑	55.30	3.83	40.40	6.89
21	0.45	1.48	0.39	0.011	0.009	0.06	0.98	0.98			0.001	0.044	0.036	↑	56.80	4.10	41.80	5.90
22	0.41	0.25	0.35	0.01	0.008	0.03	1	0.49			0.0017	0.025	0.035	↑	54.10		34.90	
23	0.37	1.01	1.02	0.008	0.009	-	1.01	1.05	0.52				-	880	53.40		50.40	
24	0.47	0.83	0.52	-	-	-	1.44	1.01	0.5				-	900	56.80		50.40	
25	0.49	1.57	0.55	-	-	-	2.11	0.5	0.32				-	↑	57.30		50.00	
26	0.47	0.61	0.51	-	-	-	2.33	0.4	0.5				-	↑	56.10	4.80	49.00	5.57
27	0.56	0.62	0.51	-	-	-	2.66	0.48	1.01				-	↑	59.80		50.40	
28	0.57	0.64	0.52	-	-	-	2.93	1.95	0.3				-	↑	59.20	3.50	55.00	4.86
29	0.63	0.99	0.51	-	-	-	2.83	0.47	0.5				-	↑	60.80	3.81	50.30	5.23
30	0.51	1.74	0.42	-	-	-	2.6	1.04	0.62				-	950	57.50	4.11	51.50	4.88
31	0.44	1.69	0.39	-	-	-	3.3	2.52	0.52				-	↑	55.90		56.50	
32	0.43	2.21	0.32	-	-	-	4.05	0.92					-	↑	56.80		48.50	
33	0.45	2.21	0.42	-	-	-	4.35	2.44	0.51				-	↑	57.20		53.00	
34	0.49	0.28	0.31	-	-	-	4.9	2.86	1.1	1.95			-	900	56.80		57.60	
35	0.49	0.92	0.33	-	-	-	4.82	2.82	1.05	2.02			-	↑	55.90		59.80	
36	0.51	2.19	0.37	-	-	-	4.69	2.88	1.05	2			-	↑	56.30		58.10	
37	0.5	0.23	0.39	-	-	-	4.91	3.88	1	0.05			-	↑	56.20		56.30	
38	0.73	0.92	0.49	-	-	1.09	8.15	1.09	0.8				-	↑	57.50		45.00	

【0089】（実施例3：焼戻し軟化抵抗性の確認テスト（焼戻し硬さに及ぼす合金元素の影響）本実施例では、表2に示される組成の直径25mmの試験片をN₂ガス雰囲気中で870～980℃で1hr加熱した後、水焼入れし、200～700℃で2hr焼戻し、水中急冷したものから硬度を測定し、各合金元素の焼戻し軟化抵抗性に対する影響を調査・解析するとともに、600℃の焼戻しによっても焼戻し硬さがHRC45以上となる合金設計手法を確立することを目的としている。

【0090】この確認テストの結果、例えば900℃から焼入れた後の600℃焼戻しによるマルテンサイト鋼の硬さに及ぼす合金元素の影響は次式で算出されることがわかった。

$$\Delta HRC = 5.7 \times (Si \text{ 重量}\% + Al \text{ 重量}\%) + 2.8 \times Cr \text{ 重量}\% + 1.1 \times Mo \text{ 重量}\% + 2.5.7 \times V \text{ 重量}\% + 7.5 \times W \text{ 重量}\%$$

ただし、前述のようにMo、V、Wについてはそれぞれ最大添加量YMo、YV、YWが存在して、この最大添加量以上に添加した合金鋼の硬さは、計算式中に最大添加量を代入して計算されるものである。

【0091】図6～図10には、表2に示されている各種供試鋼の焼戻し硬さの測定結果（「実測」と表記）と、この焼戻し硬さに及ぼす各合金元素の影響を解析定量化して計算方式に基づいて算出した結果（「計算」と表記）とが併せて示されている。これらグラフから明らかなように、各合金鋼の焼戻し硬さの計算値と実測値とが極めて良く合致し、前述の各種合金元素影響がほぼ合理的に定量化できることがわかった。

【0092】図6には、No. 1～No. 9の焼戻し硬さの実測値（焼入れ温度870℃）と計算値とが比較して示されている。この図において、No. 1～No. 3は低Cr・高Si系でMo、V添加の影響を調べたもの、No. 4～No. 6はV、Ni、Wの影響を調べたもの、No. 7～No. 9はAl、Niの複合添加の影響を調べたものである。この図から明らかなように、低CrにおいてもSi、Mo、V、W、Alの顕著な焼戻し軟化抵抗性が認められ、特にAlの焼戻し軟化抵抗性Siと同じ影響度で極めて良く算出され、焼戻し軟化抵抗性の発現メカニズムがSiにはほぼ等しいことがわかった。

【0093】また、解析に基づく計算結果と実測値との比較から、AlとNiとが共存する場合においては、NiAl系金属間化合物の時効効果に起因する硬化が確認された（1Al+1NiでΔHRC=+4）。ただし、焼入れ温度を870℃とした場合には、No. 2ではMo、No. 4ではMo、Vが、No. 5ではV、No. 6ではV、Wが前述の有効添加量をわずかに越えており、例えば950℃からの焼入れ後に焼戻しした場合の方（例えば有効Mo量：YMo=1.3-0.5×(Si+Al)）が、より効果的な焼戻し軟化抵抗性を発揮することがわかった。

【0094】図7には、No. 10～No. 22の焼戻し硬さの実測値（焼入れ温度870℃）と計算値とが比較して示されている。この図において、No. 16は焼入れ温度を980℃に上げて焼戻し処理を施したものであり、その合金中に含まれる0.5重量%Vを固溶させ

て焼戻し処理を施すことが焼戻し軟化抵抗性に有効に寄与することがわかった。

【0095】図8には、No. 23～No. 29の焼戻し硬さの実測値（焼入れ温度900℃）と計算値とが比較して示されている。これは高Cr、Mo化とV添加の関係を調査したもので、約3重量%のCrが共存する場合でも前述のMo、Vの関係が成立することが確認できた。また、No. 28は高濃度にMoを添加しているが、その有効Mo量は共存するSi量と高炭素（オーステナイト中でのMo炭化物の析出を考慮する（ $\Delta YMo = 0.15$ ））であることを考慮すると1.0重量%程度であり、例えば熱間工具鋼SKD6の600℃での焼戻し硬さと同等以上のHRC55と非常に高硬度化されていることがわかった。さらに、SKD6は1000～1050℃から焼入れし、550～600℃の焼戻し処理を施して、HRC53以下に調整して実用に供されることと比較すれば、本実施例のNo. 23～No. 29はCrを3重量%未満、Moを1重量%未満に抑え、焼入れ温度900℃に抑えたより経済的な熱間工具鋼としても有効であることがわかる。なお、これらの鋼の炭素量は0.55重量%以下に抑えるが、より好ましくはSKD6の成分範囲を考慮して0.45重量%以下にすることがより好ましいことがわかる。

【0096】図9には、No. 30～No. 33の焼戻し硬さの実測値（焼入れ温度950℃）と計算値とが比較して示されている。この図は図8よりもさらに高Cr化の影響を調べたものである。例えばNo. 31とNo. 33との比較からも明らかなように、約3.5重量%以上の高Crによって焼戻し軟化抵抗性に対するCrの影響が激減し、またCrが3.5重量%を超える鋼においてはSiの焼戻し軟化抵抗性が激減することがこの解析結果からわかった。したがって、Crの焼戻し軟化抵抗性を有効に発揮させるためには、3.5重量%以下に抑えて使用することが好ましいことがわかる。

【0097】また、No. 29～No. 33のように高Crが添加されている場合には、炭素量がCr添加量に比べて少なくなるほどCrの焼戻し軟化抵抗性の発現機構が顕著になり、解析の結果、炭素量の約7.5倍を超えたCrが添加される場合には、前述のようにCr添加量当たりの抵抗性が減少することがわかる。

【0098】図10には、No. 34～No. 38の焼戻し硬さの実測値（焼入れ温度900℃）と計算値とが比較して示されている。この図はより高Cr領域でのMo、W、Siの影響を調査したものである。これらの結果から、Wの最大有効添加量は900℃で約1.0重量%であり、1重量%以上のWの添加は急激にMoの最大

有効添加量を減じることがわかり、Wの添加量が1重量%を超えないことが望ましいことがわかる。また、Crが6重量%以上になった場合には、Cr焼戻し軟化抵抗性はさらに急減する（No. 38）こともわかった。

【0099】以上のことから、高韌性の硬質耐摩耗鋼を開発するに当たっては、前述のような最大添加量を超えるような合金元素の添加は不経済であるだけでなく、耐摩耗性にほとんど寄与せずに韌性を損なうことは明らかである。また、Si、Al、Cr等の合金元素についてもその添加量範囲によって、耐焼戻し軟化抵抗性に対する作用性が異なることから、経済性を考慮しながらより有効に添加されるのが好ましいことがわかる。

【0100】また、600℃焼戻しによるマルテンサイト鋼硬さがHRC45以上であるためには、次式を満足させるような合金元素の組み合わせが必要である。

$$21.1 \leq 5.7 \times (Si(\text{重量}\%) + Al(\text{重量}\%)) + 2.8 \times Cr(\text{重量}\%) + 11 \times Mo(\text{重量}\%) + 25.7 \times V(\text{重量}\%) + 7.5 \times W(\text{重量}\%)$$

【0101】また、高韌性耐摩耗鋼であるためには、600℃の焼戻しによって得られる上限硬さを規制しておくことが好ましく、例えばSKD6等を従来基準として参考にした場合にはHRC55以下に設定することが好ましいが、Al、Niの複合添加によって上限の硬さはHRC65にまで高めることができるので、合金元素添加範囲は次式であることがより好ましい。

$$21.2 \leq 5.8 \times (Si(\text{重量}\%) + Al(\text{重量}\%)) + 2.8 \times Cr(\text{重量}\%) + 11 \times Mo(\text{重量}\%) + 25.7 \times V(\text{重量}\%) + 7.5 \times W(\text{重量}\%) \leq 41.2$$

【0102】（実施例4；衝撃テスト結果）表2には、200℃、600℃2hrの焼戻し処理を施したものを2Uシャルピー衝撃試験に供した結果が合わせて示され、表3にも追加の本発明材と比較材の結果が示されている。この結果、200℃、600℃2hrの焼戻し処理の両方の材料において、

①Crを約1重量%以下に抑え、Moを積極的に添加したもの

②Wを0.81重量%以下添加したもの

③AlとNiを複合添加したもの

等が強韌性を示し、シャルピー衝撃値5kgf・m/cm²以上の韌性を示す焼戻しマルテンサイト組織鋼の上限炭素含有量が、AlとNiの複合添加によってほぼ1.2重量%になることがわかる。

【0103】

【表3】

TPNo.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	W	B	Nb	Al	焼入温度 ℃	硬さHRC 200℃	シャルピー衝撃値 kg-m/cm ²	硬さHRC 600℃	シャルピー衝撃値 kg-m/cm ²
39	0.15	0.07	0.3	0.012	0.009	0.09	1.01	0.26					1.07	870	42.80	6.70		Al鋼
40	0.14	0.07	1.19	0.014	0.008	1.00	1.01	0.25					1.08	870	43.10	28.00		AIN鋼
41	0.22	0.22	0.82	0.014	0.012	0.13	1.15	0.15					0.031	870	47.20	8.20		SCM420H
42	0.46	0.82	1.21	0.021	0.011	-	0.59	0.32	0.16	0.82			0.029	900	58.40	6.82	46.40	8.51
43	0.46	0.65	0.51	0.013	-	-	2.52	0.42	0.31	0.51			0.034	900	56.10	6.91	50.80	9.81
44	0.43	0.63	0.78	0.015	-	1.01	2.41	0.48	0.25	0.31			0.81	900	55.20	7.83	47.30	14.7
45	1.03	-	-	-	-	-	1.56	-	-	-				850	61.30	0.79	38.70	3.79
46	0.35	0.21	1.2	0.011	0.012	-	0.11				0.002		0.029	850	50.50	7.70		SMnB435H
47	0.6	0.25	0.93	0.016	0.008	0.98	1.04	0.35					0.97	850	60.1	12.1	47.5	15.2 (500℃)
48	0.63	0.24	0.97	0.013	0.006	1.02	1.03	0.34					0.48	850	60.7	11.8		
49	1.09	0.15	0.76	0.018	0.013	0.97	1.31	0.15					0.52	870	63.1	6.21		

【0104】図11には、No. 47、48、49を表中の温度から焼入れ、200～500℃の各温度で3h焼戻した硬さとシャルピー衝撃値の関係が示されている。HRC60の低温焼戻し状態からHRC47の500℃焼戻しまでの間に焼戻し脆性による衝撃値の低下が観測されず、とりわけ200℃の焼戻し温度で急速な靱性の回復が認められた。

【0105】また、図12には、表3中のNo. 47と表2中のNo. 10、No. 12の各焼戻し温度とシャルピー衝撃値の関係が示されており、No. 12が200℃以上の焼戻しによって急速に脆化するのに対して、No. 10の高Si材は350℃以下において靱性を維持し、500℃で顕著に脆化し、600℃で靱性が回復することがわかる。また、AlとNiを複合添加したNo. 47材では焼戻し脆化現象が認められず、極めて高い靱性を示すことがわかる。

【0106】また、低炭素なAlNi鋼（No. 40）の例では、200℃の低温焼戻しの状態においても極めて優れた靱性を示すことがわかる。また、表3の鋼材（No. 39、No. 41、No. 45、No. 46）の結果を比較して、AlNi鋼は広い炭素含有領域、広い硬さ範囲において靱性が極めて高く、適正な炭素含有量としては炭素量0.15重量%～1.20重量%が好ましいことがわかる。したがって、耐摩耗性をHRC45以上を確保することを考慮しながら、600℃焼戻しでHRC45以上が確保できるような合金設計が好ましいことがわかる。

【0107】（実施例5；浸炭焼き入れ焼戻し鋼の衝撃テスト結果）本実施例に供する試験片は、表3中のNo. 39、40、41の鋼材を980℃での焼きならし処理を施した後、シャルピー衝撃試験片形状に加工したものを使った。また、浸炭焼き入れ焼戻し処理は、図13に示すように930℃で炭素ポテンシャルが0.85重量%炭素となるようにし、浸炭硬化深さが0.8～1.2mmになるように浸炭拡散時間を5時間と設定した。焼戻し処理は180℃、3時間とした。

【0108】図14には浸炭焼き入れ焼戻し後の試験片の硬さ分布を示したが、表面浸炭硬化層の硬さはビッカース硬さHv750～800（HRC62～64相当）であり、その試験片のシャルピー衝撃値はNo. 39：

1.74kgf・m/cm²、No. 40：11.9kgf・m/cm²、No. 41：1.24kgf・m/cm²であった。また、組織観察の結果No. 39、No. 40はαFe相が残留していたので、浸炭後の焼き入れ温度を850℃から910℃に高めた試験片についてシャルピー衝撃試験を実施したところ、No. 39：2.52kgf・m/cm²、No. 40：22.6kgf・m/cm²と画期的な改善が認められた。とりわけ、No. 40の衝撃値は表3に示した低炭素濃度なベース材の衝撃値に近いものである。

【0109】この結果は、衝撃荷重のかかりやすい建機・土木機械の歯車減速機や旋回装置の歯車に適用することが極めて好ましいことがわかる。さらに、前記浸炭焼き入れ焼戻して使用される履帯ブッシュなどに対しても好ましいことがわかる。

【0110】図15（a）、（b）はNo. 40を表面炭素量が1.1重量%、1.3重量%となるように1000℃で浸炭し、Al温度以下にいったん冷却した後、870℃に再加熱焼入れした後に、200℃で3時間焼戻し処理を施したシャルピー試験片の表面から0.2mm深さの組織写真を示したものである。平均粒径が1μm以下のセメンタイト粒子がほぼ均一に分散しており、その表面浸炭硬化層の硬さはHRC62である。このようなセメンタイト粒子が微細に多く分散する表面硬化層組織を有する歯車部材は耐面圧強度に優れ、よりコンパクトな歯車減速機用歯車として期待されているが、極めて靱性に乏しいことが問題になっていたが、シャルピー衝撃試験の結果（No. 40：4～6kgf・m/cm²、No. 41：0.7～1.0kgf・m/cm²）から、前述のAlとNiの複合添加する本発明鋼を使用することによって靱性が改善され、前記セメンタイト粒子を分散させた高耐面圧用の歯車に適用できることがわかった。

【0111】（実施例6；高硬度高靱性鋼の適用事例の形態1）本実施例においては、上述の高硬度高靱性鋼の適用が期待される建設・土木機械における耐摩耗部品の耐摩耗性を整理し、本発明による作用効果を明らかにした。表4には代表の各部品の炭素濃度と焼き入れ焼戻し硬さおよび代表的な合金成分から算出される焼戻しパラメータを示したが、まず、これら部品の多くは高靱性化

と高硬度化の両立を配慮して、全体的には、含有される炭素量は0.25～0.40重量%の範囲に設定し、HRC52以上の硬さで使用されることは少ないために、その耐摩耗性が十分でないことがわかる。また、岩盤掘削作業などの頻度が高く、焼戻し軟化抵抗性を必要とするバケットツース、リップポイント、エンドビット、カッティングエッジ類において、前述の焼戻しパラメータは10～22の範囲で成分調整されており、600℃焼戻し後の硬さがHRC33～46の範囲と低いために、十分な耐摩耗性が得られないことが分かる。

【0112】また、これらの鋼材においては、AlとNiの複合添加による高硬度高韌性化事例は無く、また前記の実施例でのシャルピー衝撃値の結果から韌性不足による割れ、欠け、折損の不具合が十分解決されていない。

【0113】なお、当社においては、ピッカース硬さHv500の焼き入れ焼戻し鋼の耐摩耗性(W;摩耗量)を1とした場合の、各種鋼材の硬さと摩擦発熱による硬さ軟化が顕著でない条件でのガウジング耐摩耗性の関係を調査したデータがあり、近似的には耐摩耗性は式 $W \times (Hv)^2 = 250000$ 関係で表される(図16参照)。この結果によると、例えば前記部品の韌性を変えずに平均硬さHRC50(Hv513)をHRC55(Hv600)高めることが可能になると、その耐摩耗性は約20%以上の大きく改善されることが分かり、例えば、前記AlとNiを複合添加した高硬度高韌性鋼を使って、適切な熱処理を施し、HRC55以上でシャルピー衝撃値を5kgf・m/cm²以上に改善した履帯リンク、履帯シュー、履帯ブッシュ、バケットツース、カッティングエッジ、エンドビット、セグメントティース、下転輪ローラ、トンネル掘削用のツールビット、シャンク、ディスクカッター、チゼル工具、土質改良機の土砂攪拌用のソイルカッター等の耐摩耗性を顕著に改善できることは明らかである。

【0114】また、前記岩盤掘削作業などの頻度が高く、焼戻し軟化抵抗性を必要とするバケットツース、リップポイント、エンドビット、カッティングエッジ類は前述の焼戻しパラメータを使って、600℃の焼戻しでHRC45以上の硬さ、より好ましくはHRC50以上になるように合金元素を適正に添加し、さらに、AlとNiの複合添加によってより韌性を高めることによって、割れ、欠け、折損不具合を防止できることは明らかである。

【0115】さらにまた、実施例4、5の衝撃試験結果ら明らかなように、AlとNiの複合添加によって改善される韌性は、粒界強度(旧オーステナイト粒界)の強化に繋がり、耐遅れ破壊性が問題になるような履帯シューボルトの改善に極めて効果的である。ボルト類の遅れ破壊は、HRC40以上の焼き入れ焼戻し鋼を使用するボルトにおいて頻発することが知られており、かつ、焼

戻し脆性の顕著な鋼において発生しやすいことから、合金元素をあまり含有せず、Bで焼入れ性を高めた表4中のS35Cのボロン鋼が多く用いられているが、そのシャルピー衝撃値はHRC40硬さで、7～11kgf・m/cm²程度であり、本発明でのAlとNiの複合添加によるシャルピー衝撃値の改善効果に比べて十分でなく、本発明の焼戻し脆性の抑制と顕著な粒界強度の改善によってHRC41以上でシャルピー衝撃値が式 $\log(263 \times HRC + 2.225)$ の関係を満足させることによって、より高張力なボルトが製造できることは明らかである。

【0116】また、実施例4の図11に示すように、表3のNo.40は硬さHRC60においても顕著なシャルピー衝撃値を確保しており、歯車を想定したSCM420H浸炭焼き入れ焼戻し材に比べても極めて韌性が高いこと(実施例5参照)から、AlとNiを複合添加した0.45～1.2重量%炭素を含有する本発明鋼を用いて、歯車加工後に高周波焼入れ焼戻しもしくは適切な公知の焼き入れ焼戻し処理を施し、表面硬さがHRC55以上の歯車が、従来の浸炭焼き入れ焼戻した歯車よりもより安価に製造できることは明らかである。なお、歯車の耐面圧強度を高めるためには、表面硬さがHRC58以上であることがより好ましく、さらに、表面層において平均粒径が1μm以下のセメント粒子が分散していることが好ましいことは明らかである。

【0117】また、実施例4、5の衝撃試験結果から明らかなように、炭素濃度が～1.2重量%の高濃度な範囲の焼入れ焼戻し鋼および浸炭焼入れ焼戻し鋼において5kgf・m/cm²以上のシャルピー衝撃値を示すことから、タップ、プレス金型、たがね、シャーリング用剪断刃、鋸刃、刃物などの部材に対しても適用することができるとは明らかである。

【0118】(実施例7：高硬度高韌性鋼の適用事例の形態2)本実施例においては、上述の高硬度高韌性鋼の適用が期待される建設・土木機械における高張力鋼板や耐摩耗鋼板等の低温割れ、再熱割れが、溶接熱による母材の旧オーステナイト粒界の脆化に起因することに着眼し、本高硬度高韌性鋼がこれらの溶接割れを防止するのに有効であることを明らかにする。

【0119】より高張力な溶接用鋼板や耐摩耗性溶接鋼板の開発とともに、溶接後の母材における低温割れを防止する対策が重要となり、それらの鋼板の化学成分に基づく規格が制定されている。当社においても、50kgf/mm²以上の高張力鋼やそれを利用した耐摩耗溶接用鋼に対しては、各元素の重量%で計算される新日本製鉄社の規格値PH：

$$PH = C + Mn / 10 + Cr / 15 + Mo / 6 + 3V + 40P + 100B$$

が1.0以下となるように鋼板成分が調整されており、

この関係式から、粒界脆化を顕著に引き起こすPが極めて顕著に溶接割れを助長するために、Pが0.01重量%以下に規され、鋼材の焼入れ性を確保するためのB量が慎重に制御され、かつ、炭素量が0.1～0.3重量%にとどめられたものとなっている。

【0120】例えば、表4のバケット耐摩耗用鋼板はバケットの底面に隅肉溶接されて利用されるものであるため、炭素量が0.3重量%以下に制御され、かつ、上述のような成分規制をして溶接割れの発生を防止したものであるために、十分な耐摩耗性が得られない問題があったが、本実施例ではFe-0.45C-0.21Si-1.2Mn-0.5Ni-0.15Cr-0.018P-0.0011B(PH=1.41)とそれに0.26重量%Alを添加した鋼(PH=1.48)の二種類の焼入れ焼戻し鋼板(硬さ:約HRC54、厚さ15mm、幅70mm、長さ600mm)をバケット底面に室温で長手方向の二隅を隅肉CO₂溶接し、その溶接割れを調査した結果、Al無添加鋼においては5本中2本に割れが発生したが、Al添加鋼においては20本中に割れの無いことが分かった。

【0121】また、それらを溶接したバケットを残留応力除去の目的で、500℃に30分加熱した後に、室温に空冷し、溶接部の割れを調査した結果、Al無添加鋼においては残り3本すべてに割れが発生するのに対してAl添加鋼には割れの発生が認められないことがわかった。したがって、0.15重量%以上のAlと0.3重量%以上のNiが複合添加される高張力鋼板の上限PH値がPH=1.4～1.48となり、P含有量を0.02重量%以下に限定した場合には、炭素添加量は約0.6重量%が上限となるので、適正炭素量が0.1～0.6重量%であることがわかる。

【図面の簡単な説明】

【図1】図1は、FeSi系合金のAc3温度線に対する各種合金元素影響を示すグラフである。

【図2】図2は、各種耐摩耗鋼の焼戻し硬さを示すグラフである。

*

*【図3】図3は、各種焼戻し鋼の硬さと衝撃値との関係を示すグラフ(1)である。

【図4】図4は、各種焼戻し鋼の硬さと衝撃値との関係を示すグラフ(2)である。

【図5】図5は、シャルピー衝撃値と炭素量との関係を調査した予備実験結果を示すグラフである。

【図6】図6は、No.1～No.9の焼戻し硬さの実測値(焼入れ温度870℃)と計算値とを比較して示すグラフである。

10 【図7】図7は、No.10～No.22の焼戻し硬さの実測値(焼入れ温度870℃)と計算値とを比較して示すグラフである。

【図8】図8は、No.23～No.29の焼戻し硬さの実測値(焼入れ温度900℃)と計算値とを比較して示すグラフである。

【図9】図9は、No.30～No.33の焼戻し硬さの実測値(焼入れ温度950℃)と計算値とを比較して示すグラフである。

20 【図10】図10は、No.34～No.38の焼戻し硬さの実測値(焼入れ温度900℃)と計算値とを比較して示すグラフである。

【図11】図11は、No.47～No.49の焼戻し硬さとシャルピー衝撃値との関係を示すグラフである。

【図12】図12は、No.10,12,47の焼戻し温度とシャルピー衝撃値との関係を示すグラフである。

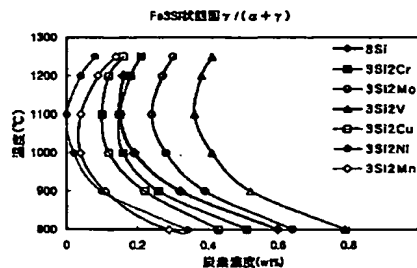
【図13】図13は、浸炭焼き入れ条件を示すグラフである。

【図14】図14は、浸炭焼き入れ焼戻し後のシャルピー試験片における硬さ分布図である。

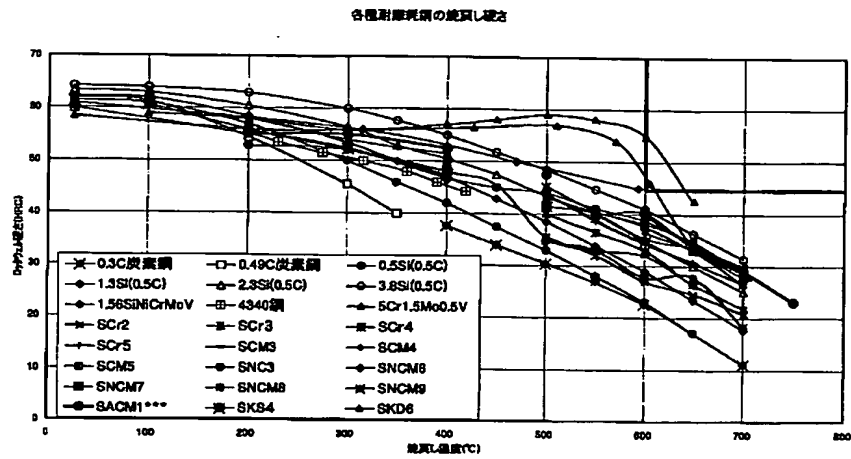
30 【図15】図15(a)(b)は、表面炭素濃度が1.1重量%、1.3重量%になるように1000℃で2時間浸炭した後に室温に冷却し、850℃で1時間の再加熱焼入れ焼戻し処理を施した表面硬化層組織である。

【図16】図16は、S45Cの焼き入れ焼戻し鋼(Hv500)のガウジング摩耗量を1とした時の各種鋼の硬さと摩耗比の関係を示すグラフである。

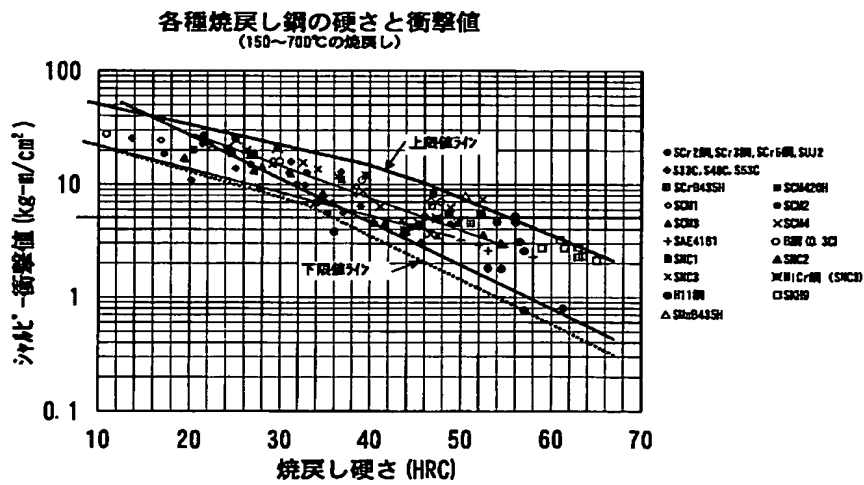
【図1】



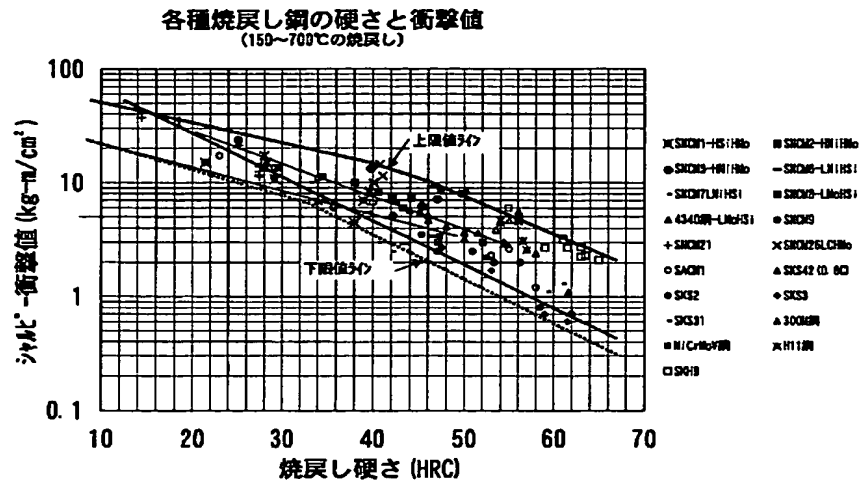
【図2】



【図3】

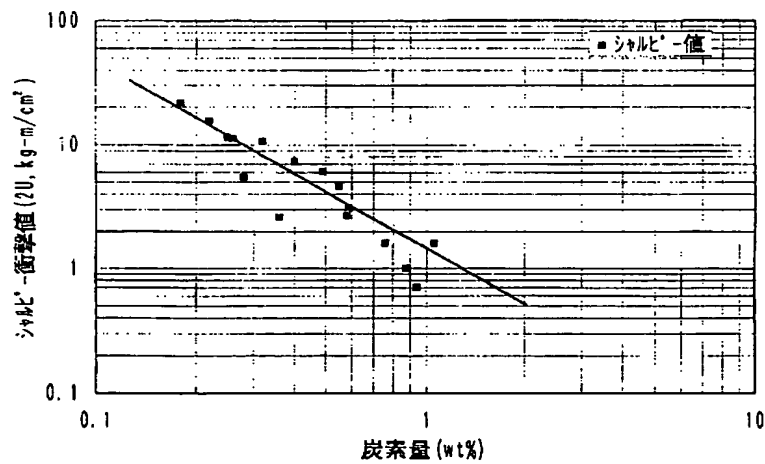


【図4】



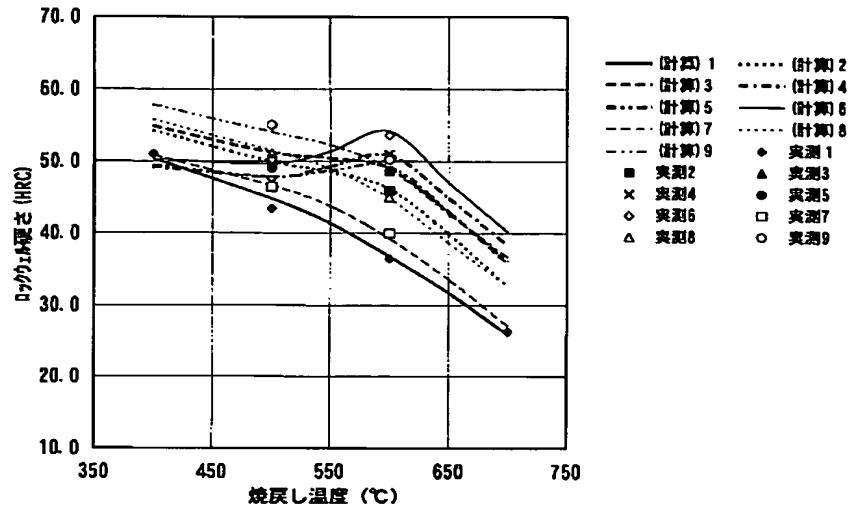
【図5】

シャルピー衝撃値と炭素量との関係の予備実験結果



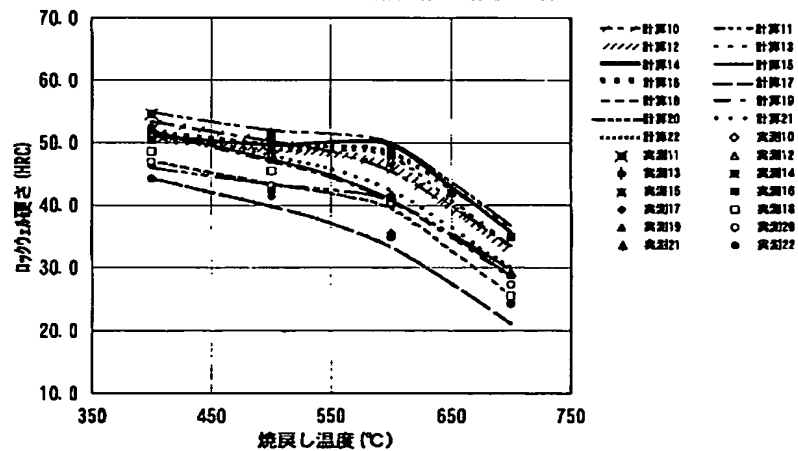
【図6】

TPNo. 1～9の焼戻し硬度と計算値の比較

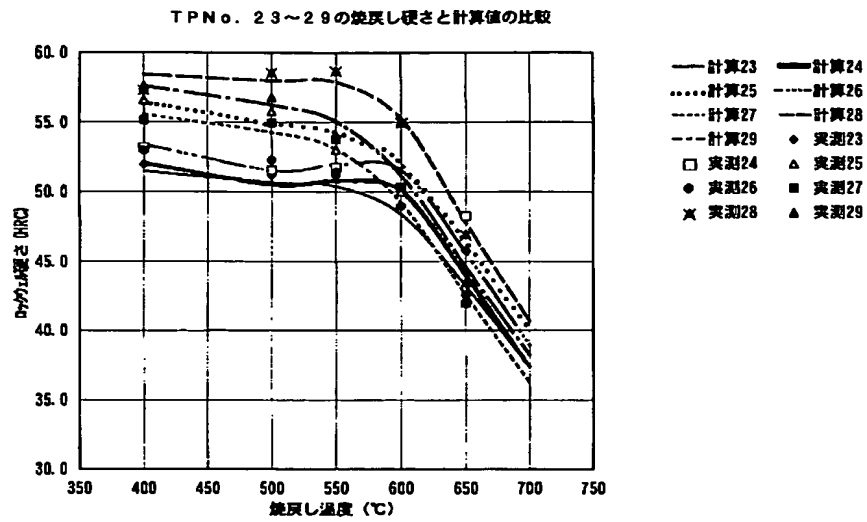


【図7】

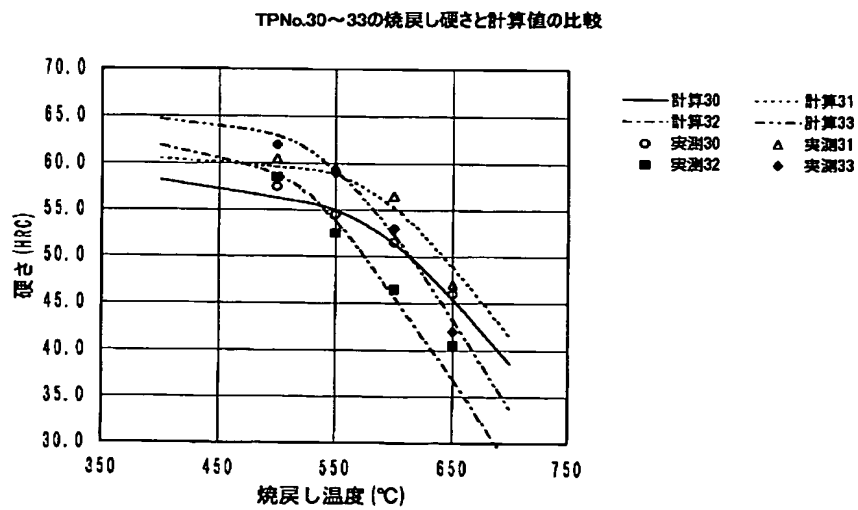
TPNo 10～22の焼戻し硬度と計算値の比較



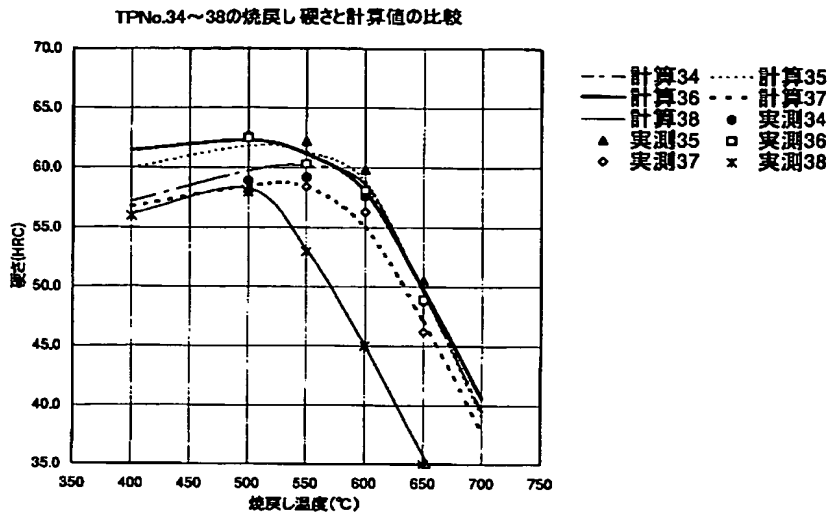
【図8】



【図9】

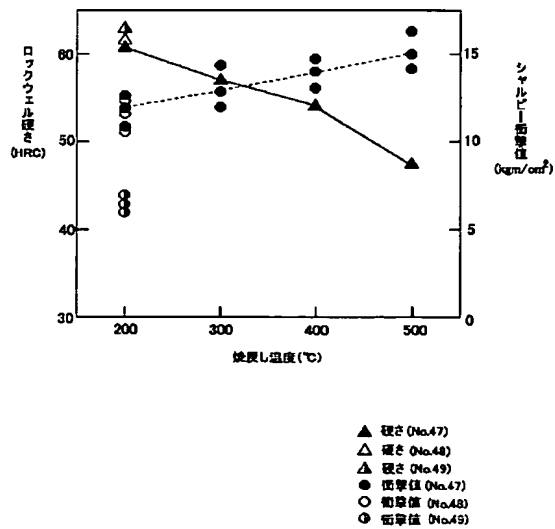


【図10】



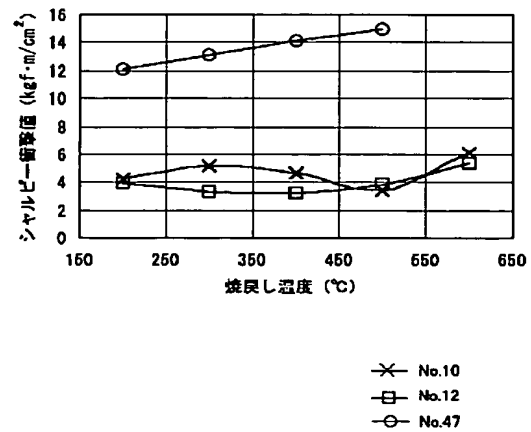
【図11】

TPNo.47~No.49の焼戻し硬さとシャルピー衝撃値の関係



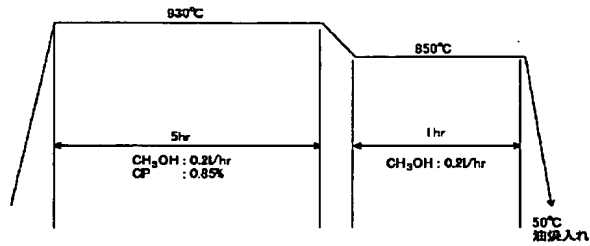
【図12】

TPNo.47,10,12の焼戻し温度とシャルピー衝撃値の関係



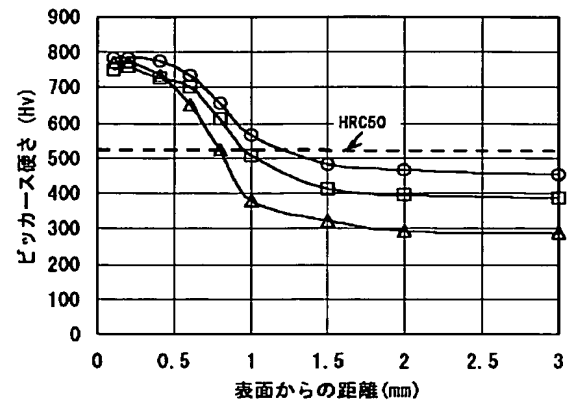
【図13】

浸炭焼入れ焼戻し条件



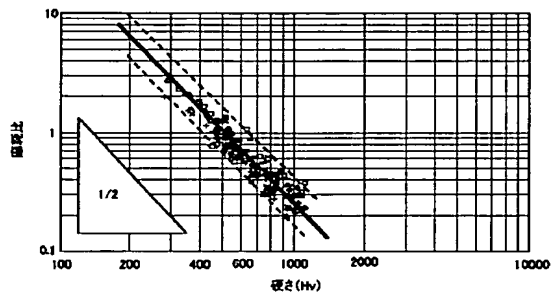
【図14】

浸炭焼入れ焼戻し後の硬さ分布 (No.39,40,41)



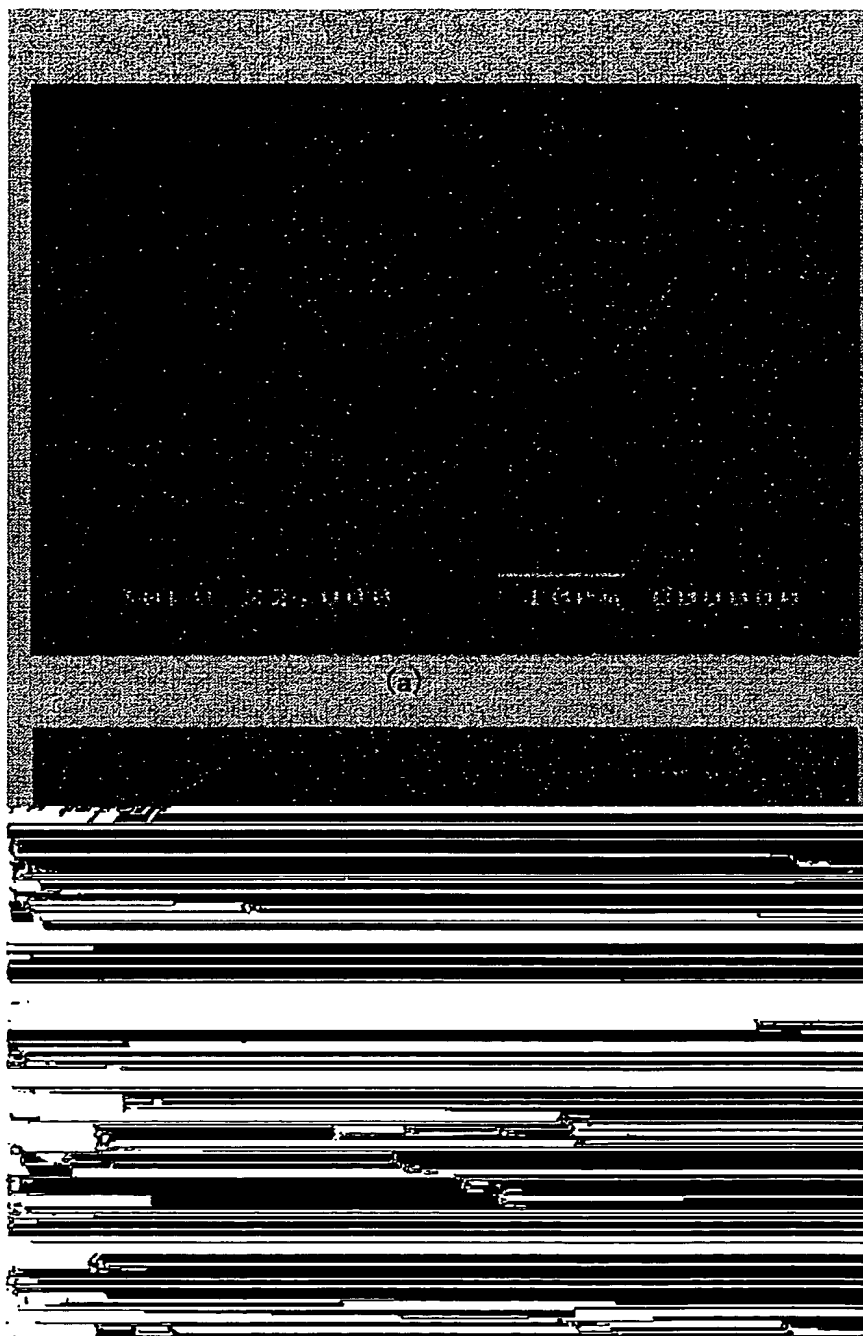
【図16】

各種耐磨耗材のガウジング摩耗比(標準材S45C,Hv500)



- | | |
|-------------|----------|
| ◇ S30C | □ SNCM8 |
| ▲ S45C | ▽ S50C |
| + SK3 | ● SCMnMo |
| ○ SMC34C | ● SCM3 |
| + SNCM2319K | ■ S1n1H |
| ★ SHSC1 | ■ SCM24 |
| SCMnCrMo3 | ~ SUP9 |
| ● SGM4 | ■ SCM2 |
| ● SGM5 | X SK2 |
| ≡ SK4(焼戻) | + SK7 |
| ● SLA2 | - SK4 |
| ◆ SKD1 | ■ SKD11 |
| ● R140 | ● SUS37 |
| ○ SKD12 | ◇ 10C38n |
| - SC7Mn | - SCM24 |
| ○ SCMnCrG | △ SUS27 |

【図15】



フロントページの続き

(51)Int.Cl.	識別記号	F I	タームコード (参考)
// C 2 1 D	1/06	C 2 1 D	1/06
	6/00		6/00
			A
			L
			W
	1 0 1		1 0 1 Z
	9/00		9/00
			B
			E
	9/22		9/22
	9/32		9/32
	9/42		9/42
			A

F ターム (参考) 2D058 BA01
 4K028 AA01 AB01 AB06
 4K042 AA12 AA18 AA20 AA24 AA25
 BA02 BA03 BA04 CA02 CA03
 CA04 CA05 CA06 CA07 CA08
 CA09 CA10 CA12 CA13 DA01
 DA02 DB01 DC02 DD02